

Análisis de la inversión pública para la reducción de riesgo de desastres

Evaluación del riesgo de deslizamiento en el sector vial y posibles medidas para la mitigación del riesgo -Estudio de caso en Ecuador-

Banco Interamericano de Desarrollo

División de Medio Ambiente,
Desarrollo Rural y
Administración de Riesgos por
Desastres

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-2360

Análisis de la inversión pública para la reducción de riesgo de desastres

Evaluación del riesgo de deslizamiento en el sector vial y posibles medidas para la mitigación del riesgo -Estudio de caso en Ecuador-

Banco Interamericano de Desarrollo

Enero 2022

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Análisis de la inversión pública para la reducción de riesgo de desastres: evaluación del riesgo de deslizamiento en el sector vial y posibles medidas para la mitigación del riesgo: estudio de caso en Ecuador / Banco Interamericano de Desarrollo.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2360)

1. Roads-Risk assessment-Ecuador. 2. Landslide hazard analysis-Ecuador. 3. Roadside improvement-Ecuador. 4. Public investments. I. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Administración de Riesgos por Desastres. II. Serie.

IDB-TN-2360

Código JEL: Q54

Palabras clave: Riesgo de deslizamientos, daños económicos, inversión pública en reducción del riesgo de desastres, sector vial.

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

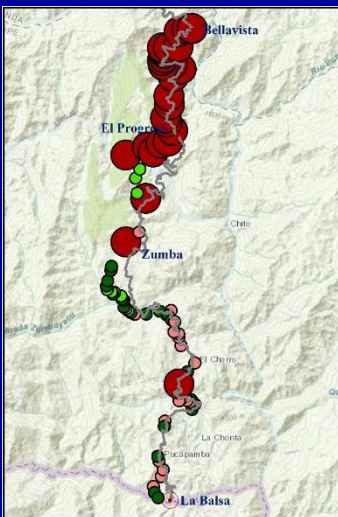
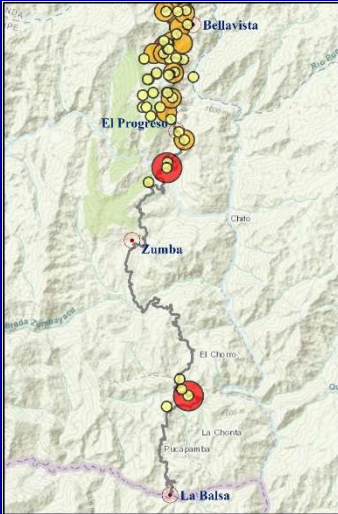
Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



**ANÁLISIS DE INVERSIÓN PÚBLICA PARA
LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE
DESASTRES:
EVALUACIÓN DEL RIESGO DE
DESLIZAMIENTO EN EL SECTOR VIAL Y
POSIBLES MEDIDAS PARA LA
MITIGACIÓN DEL RIESGO - ESTUDIO
DE CASO EN ECUADOR**



Enero, 2022

Este documento fue preparado por:

Especialistas del Banco Interamericano de Desarrollo: Hori Tsuneki, Especialista en Gestión del Riesgo de Desastres y Marisol Inurritegui, Especialista en Desarrollo Rural.

Consultores externos:

Dirección y coordinación de grupos de trabajo técnico: Ingeniería Técnica y Científica SAS, Bogotá- Colombia, Luis Eduardo Yamín, Director General del Proyecto y Rafael Fernández, Coordinador Técnico.

Especialistas y asesores -Grupos de trabajo-: Ingeniería Técnica y Científica SAS, Bogotá-Colombia, Juan Felipe Velandia, Ingeniero; Juan Echeverry, Ingeniero Especialista; Daniela Garzón, Ingeniero; Rodolfo Franco, Geólogo; Álvaro Hurtado, Ingeniero Especialista, Carlos Oliveros, Ingeniero; Jonathan Andrés Narváez y Daniel Ávila, Geotécnico.

Este estudio fue financiado a través de la Cooperación Técnica Regional RG-T-3369 de Multi Fondo Fiduciario de Donantes para la Prevención de Desastres del Banco, apoyado por Canadá, Japón, Corea y España.

El equipo del Proyecto agradece a los gobiernos de Canadá, Japón, Corea y España por su contribución a este fondo.

TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS GENERALES	2
1.2 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	3
1.3 ENFOQUE METODOLÓGICO	4
2. INFORMACIÓN DISPONIBLE	6
2.1 ENTIDADES PARTICIPANTES Y CONSULTADAS.....	6
2.2 ESTUDIOS PREVIOS DE REFERENCIA.....	6
2.3 INFORMACIÓN RECOPIADA.....	7
3. INESTABILIDAD DEL TERRENO, INUNDACIONES Y DESCARGAS TORRENCIALES.....	13
3.1 TRAMOS Y TRAZADOS DE ANÁLISIS.....	13
3.2 RECONOCIMIENTO EN TERRENO DE LA VÍA.....	14
3.3 RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO.....	20
3.3.1 GEOLOGÍA GENERAL TRAZADO PROPUESTO EN 2012	20
3.3.2 GEOLOGÍA GENERAL TRAZADO PROPUESTO EN 2019	29
3.3.3 RESUMEN RESULTADOS	32
3.3.4 REGISTRO FOTOGRÁFICO Y TIPOS DE PROCESOS	33
3.4 AMENAZA DE LLUVIA.....	35
3.4.1 METODOLOGÍA.....	35
3.4.2 INFORMACIÓN BASE.....	37
3.4.3 RESULTADOS MÁXIMOS MENSUAL ANUAL	41
3.4.4 CAMBIO CLIMÁTICO	44
3.4.5 MODELO DE AMENAZA ESTOCÁSTICO.....	59
3.5 AMENAZA SÍSMICA.....	64
3.5.1 METODOLOGÍA.....	64
3.5.2 ESCENARIOS ESTOCÁSTICOS PARA EL ANÁLISIS.....	65
3.6 SUSCEPTIBILIDAD A INESTABILIDAD Y DESLIZAMIENTOS	68
3.6.1 RESULTADOS PARA EL ESCENARIO BASE	69
3.6.2 RESULTADOS CASO 2.....	71
3.6.3 RESULTADOS CASO 3.....	72

3.6.4	RESULTADOS CASO 4.....	73
3.6.5	RESULTADOS CASO 5.....	74
3.6.6	RESULTADOS CASO 6.....	75
3.6.7	RESULTADOS AFECTACIÓN EN POBLACIONES	75
3.7	SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES	80
3.7.1	GENERALIDADES	80
3.7.2	METODOLOGÍA.....	80
3.7.3	INFORMACIÓN BASE.....	82
3.7.4	RESULTADOS	84
3.8	SUSCEPTIBILIDAD A DESCARGAS TORRENCIALES.....	85
3.8.1	GENERALIDADES	85
3.8.2	METODOLOGÍA.....	85
3.8.3	RESULTADOS	87
4.	EVALUACIÓN DEL RIESGO Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN.....	91
4.1	ENFOQUE METODOLÓGICO	91
4.2	FUNCIONES DE VULNERABILIDAD AL DESLIZAMIENTO	93
4.2.1	GENERACIÓN DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD PARA DESLIZAMIENTOS	93
4.2.2	VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN	97
4.2.3	COSTOS DIRECTOS DE REMOCIÓN DE ESCOMBROS PARA LA SITUACIÓN SIN OBRAS DE MITIGACIÓN	99
4.2.4	COSTOS DIRECTOS POR PÉRDIDA DE BANCA	100
4.2.5	COSTOS INDIRECTOS POR INTERRUPCIÓN DE TRÁFICO	100
4.3	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR LLUVIAS INTENSAS – SIN OBRAS DE MITIGACIÓN	102
4.3.1	RIESGO EN TÉRMINOS DE VOLUMEN DE SUELO INESTABLE O DESLIZADO	102
4.3.2	RIESGO EN TÉRMINOS DE TIEMPO DE INTERRUPCIÓN DE LA VÍA	104
4.3.3	RIESGO EN TÉRMINOS DE COSTOS DE RECUPERACIÓN DE LA VÍA	105
4.3.4	VALIDACIÓN DE COSTOS SEGÚN INFORMACIÓN DEL MTOP.....	108
4.4	MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO.....	109
4.4.1	TIPOS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN	109
4.4.2	MEDIDAS VERDES DE MITIGACIÓN	111
4.4.3	MEDIDAS GRISES DE MITIGACIÓN	114
4.4.4	VALORACIÓN ECONÓMICA UNITARIA DE LAS MEDIDAS.....	120
4.4.5	COSTOS DIRECTOS EN LA SITUACIÓN CON OBRAS DE MITIGACIÓN	131
4.5	SELECCIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN EN SITIOS CRÍTICOS.....	131
4.6	BENEFICIOS POR LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN.....	138

4.6.1	BENEFICIOS ANUALES Y FRECUENCIAS	138
4.6.2	PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLES Y BENEFICIOS CORRESPONDIENTES	141
4.6.3	EVALUACIÓN BENEFICIO COSTO Y EFICIENCIAS DE LAS MEDIDAS	143
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	152
5.1	CONCLUSIONES.....	152
5.2	RECOMENDACIONES.....	154
6.	REFERENCIAS	156
7.	ANEXO 1 – INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS..	159
8.	ANEXO 2 – MEDIDAS NO ESTRUCTURALES - SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA.....	169

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Marco conceptual de reducción del riesgo	4
Figura 2. Enfoque metodológico operacional del presente estudio	5
Figura 3. Trazados analizados. Fuente: elaboración propia	14
Figura 4. Esquema tramos visitados. Fuente: elaboración propia	15
Figura 5. Fotografías Tramo 1. Fuente: Original	17
Figura 6. Fotografías Tramo 2. Fuente: Original.	19
Figura 7. Interpretación de fotografías aéreas Trazado propuesto en 2012. Fuente: Original, basada a las fotografías aéreas tomadas de Google Maps.	27
Figura 8. Fotografías de interpretación fotográfica de fotografías aéreas Trazado propuesto en 2019. Fuente: Original, basada a las fotografías aéreas tomadas de Google Maps.	31
Figura 9. Puntos críticos identificados en los trazados. Fuente: elaboración propia.	33
Figura 10. Registro fotográfico de procesos y tipos de materiales	35
Figura 11. Disponibilidad de datos por estación y periodo seleccionado de análisis	38
Figura 12. Precipitación media mensual multi-estación	39
Figura 13. Precipitación media mensual multianual en estaciones representativas en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.	40
Figura 14. Precipitación media anual en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.	41
Figura 15. Mapas probabilistas de lluvia para diferentes periodos de retorno.....	43
Figura 16. Diagrama de cajas y bigotes de valores medios mensuales de precipitación de los 21 MCGs y los observados	50
Figura 17. Coeficiente de correlación promedio por MCG	51
Figura 18. Precipitación media mensual multianual observada y proyectada (RCP 4.5 y 8.5).....	52
Figura 19. Precipitación media anual con cambio climático y comparación con periodo observado.....	53
Figura 20. Mapas probabilistas de lluvia considerando el cambio climático para el escenario RCP 4.5.....	55

Figura 21. Mapas probabilistas de lluvia considerando el cambio climático para el escenario RCP 8.5.....	56
Figura 22. Diferencia porcentual en la amenaza de lluvia escenario RCP4.5.....	57
Figura 23. Diferencia porcentual en la amenaza de lluvia escenario RCP8.5 – Periodo observado	58
Figura 24. Distribuciones de probabilidad de precipitaciones para los 12 meses del año	60
Figura 25. Metodología de generación de catálogo de eventos de precipitaciones	62
Figura 26. Catálogos de eventos de precipitación a nivel mensual.....	63
Figura 27. Metodología modelo de amenaza sísmica probabilista (BID-ITEC, 2021).....	64
Figura 28. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s^2) para un periodo de retorno de 500 años. Fuente: (BID-ITEC, 2021).....	65
Figura 29. Desagregación sísmica para la zona de estudio	66
Figura 30. Escenarios sísmicos seleccionados para el análisis. Fuente: elaboración propia basada en resultados del perfil de riesgo nacional (BID-ITEC, 2021).....	67
Figura 31. Esquema de determinación FS (Hurtado & Yamin, 2018).....	69
Figura 32. Susceptibilidad a deslizamientos escenario base. Fuente: elaboración propia	69
Figura 33. Posibles combinaciones de amenazas.....	70
Figura 34. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 2. Fuente: elaboración propia	71
Figura 35. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 3. Fuente: elaboración propia	72
Figura 36. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 4. Fuente: elaboración propia	73
Figura 37. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 5. Fuente: elaboración propia	74
Figura 38. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 6. Fuente: elaboración propia	75
Figura 39. Centros poblados analizados. Fuente: elaboración propia.....	76
Figura 40. Susceptibilidad Caso 2 en centros poblados. Fuente: elaboración propia	78
Figura 41. Susceptibilidad Caso 3 en centros poblados. Fuente: elaboración propia	78
Figura 42. Susceptibilidad Caso 4 en centros poblados. Fuente: elaboración propia	79
Figura 43. Susceptibilidad Caso 5 en centros poblados. Fuente: elaboración propia	79
Figura 44. Susceptibilidad Caso 6 en centros poblados. Fuente: elaboración propia	80
Figura 45. Indicador de precipitación total diaria sobre el área de estudio. Adaptada del Mapa No°49 de (INAMHI, 2015)	83
Figura 46. Número de curva en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia	84

Figura 47. Susceptibilidad a inundación para los dos trazados viales. Fuente: elaboración propia.....	85
Figura 48. Cuencas susceptibles a descargas torrenciales en los dos posibles ejes viales. Fuente: elaboración propia	89
Figura 49. Susceptibilidad a descargas torrenciales en las cuencas de los dos posibles. Fuente: elaboración propia	90
Figura 50. Metodología general de evaluación de medidas estructurales	93
Figura 51. Metodología de construcción de funciones de vulnerabilidad de deslizamientos	94
Figura 52. Ubicación espacial de los eventos de deslizamientos del catálogo. Fuente: elaboración propia. Datos recopilados por MTOP	94
Figura 53. Valores estadísticos de (a) Volúmenes unitarios, (b) precipitaciones promedios mensuales asociadas, (c) relación entre volúmenes unitarios y precipitaciones promedios mensuales de procesos remontantes y (d) relación para el catálogo completo. (Fuente Ministerio de Transporte y Obras Públicas en su zonal de Zamora-Chinchipe)	95
Figura 54. Estadísticas de bases de datos de deslizamientos remontantes recopiladas por Rickli (2009).....	96
Figura 55. Estadísticas de volúmenes unitarios para deslizamientos en materiales graníticos	96
Figura 56. Funciones de vulnerabilidad a deslizamientos para cada proceso de deslizamiento.....	97
Figura 57. Eventos históricos MTOP. Fuente: elaboración propia	98
Figura 58. Modelo de susceptibilidad para precipitaciones actuales y periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia.....	98
Figura 59. Puntos críticos identificados mediante interpretación de fotografías aéreas. Fuente: elaboración propia	99
Figura 60. Proyecciones de tráfico de la ruta.	101
Figura 61. Histograma de volumen esperado de tierra deslizado anual.....	103
Figura 62. Volumen deslizado esperado anual. Fuente: elaboración propia.....	104
Figura 63. Histograma de días de interrupción del servicio.....	105

Figura 64. Costos directos esperados por eventual remoción de escombros e indirectos por interrupción del servicio para el trazado propuesto en 2012.....	106
Figura 65. Costos directos esperados por eventual remoción de escombros e indirectos por interrupción del servicio para el trazado propuesto en 2019.....	107
Figura 66. Pérdida máxima probable escenario actual.....	108
Figura 67. Medidas de mitigación en proyectos viales	110
Figura 68. Conformación del talud y restitución de la capa vegetal. Fuente: elaboración propia.....	111
Figura 69. Muro en gaviones y drenajes horizontales. Fuente: elaboración propia.....	112
Figura 70. Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado. Fuente: elaboración propia.....	113
Figura 71. Muro control escombros y malla biaxial. Fuente: elaboración propia	114
Figura 72. Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados. Fuente: elaboración propia.....	115
Figura 73. Túnel falso – Viaducto. Fuente: elaboración propia.....	116
Figura 74. Muro de concreto lanzado con pernos de anclaje. Fuente: elaboración propia.....	117
Figura 75. Muro de contención gravitacional. Fuente: elaboración propia	118
Figura 76. Retiro de material y hormigón de limpieza. Fuente: elaboración propia.....	119
Figura 77. Mitigación pérdida de banca. Fuente: elaboración propia	120
Figura 78. Esquema conformación de talud y restitución de la capa vegetal	121
Figura 79. Esquema pantallas concreto con anclaje preesforzado	122
Figura 80. Esquema túnel falso - viaducto.....	123
Figura 81. Esquema muro en gaviones y drenajes horizontales	124
Figura 82. Esquema muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	125
Figura 83. Esquema pantalla de concreto con pernos de anclaje	126
Figura 84. Esquema muro control de escombros y malla biaxial	127
Figura 85. Esquema muro de contención gravitacional	128
Figura 86. Esquema retiro de material y hormigón de limpieza	129
Figura 87. Esquema mitigación por pérdida de banca	130
Figura 88. Beneficios generados por la implementación de las obras	139
Figura 89. Beneficio anual esperado por punto crítico	141
Figura 90. Pérdida máxima probable trazados analizados	142

Figura 91. Relación beneficio – costo de las obras identificadas en los puntos críticos para el escenario verde en el trazado propuesto en 2012	144
Figura 92. Relación beneficio – costo de las obras identificadas en los puntos críticos para el escenario gris en el trazado propuesto en 2012	145
Figura 93. Relación beneficio – costo de las obras identificadas en los puntos críticos para el escenario verde en el trazado propuesto en 2019	146
Figura 94. Relación beneficio – costo de las obras identificadas en los puntos críticos para el escenario gris en el trazado propuesto en 2019	147
Figura 95. Ubicación de pluviómetros en el trazado propuesto en 2019	171
Figura 96. Algoritmo de procesamiento en tiempo real del SAT	173

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información básica recopilada.....	7
Tabla 2. Información estudio 2012.....	7
Tabla 3. Información enviada por AECOM	8
Tabla 4. Información recopilada por el contratista diseñador	12
Tabla 5. Sitios potencialmente inestables y condiciones estimadas de materiales - Trazado propuesto en 2012	28
Tabla 6. Sitios potencialmente inestables y condiciones de materiales - Trazado propuesto en 2012	31
Tabla 7. Estaciones pluviométricas y periodos de tiempo con información disponible....	37
Tabla 8. Modelos Climáticos Globales. Quinto Reporte IPCC. Fuente: (CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project , 2016)	45
Tabla 9. Casos de susceptibilidad de inestabilidad analizados.....	70
Tabla 10. Población total centros urbanos.....	77
Tabla 11. Parámetros geomorfológicos empleados en metodología simplificada	86
Tabla 12. Costos unitarios para retiro de escombros por metro cúbico.	100
Tabla 13. Rendimientos de remoción de tierras por metro cúbico.....	101
Tabla 14. Costo medio de tráfico de la ruta. Fuente: (Montenegro, 2015)	102
Tabla 15. Valor esperado de volumen deslizado	103
Tabla 16. Valor esperado de tiempo de interrupción del servicio por deslizamientos....	105
Tabla 17. Valores esperados de costos directos e indirectos para la vía actual.....	108
Tabla 18. Comparación de costos modelados con valores registrados por MTOP	109
Tabla 19. Caracterización medidas grises y verdes	110
Tabla 20. APU conformación de talud y restitución de la capa vegetal.....	121
Tabla 21. APU pantallas concreto con anclaje preesforzado	122
Tabla 22. APU túnel falso - viaducto	123
Tabla 23. APU muro en gaviones y drenajes horizontales.....	124
Tabla 24. APU muro en gaviones y drenajes en espina de pescado.....	125
Tabla 25. APU para pantalla de concreto con pernos de anclaje	126
Tabla 26. APU muro control de escombros y malla biaxial.....	127
Tabla 27. APU muro de contención gravitacional	128

Tabla 28. APU retiro de material y hormigón de limpieza	129
Tabla 29. APU mitigación por pérdida de banca.....	130
Tabla 30. Costos unitarios de mantenimiento de las obras de intervención por metro lineal.	131
Tabla 31. Escenarios de intervención	132
Tabla 32. Medidas de mitigación por escenario para trazado propuesto en 2012.....	132
Tabla 33. Medidas de mitigación por escenario para trazado propuesto en 2019.....	135
Tabla 34. Presupuesto obras de mitigación para los trazados analizados	138
Tabla 35. Valores esperados anuales de costos y beneficios.....	140
Tabla 36. Priorización de intervenciones mediante criterio E/C para trazado propuesto en 2012	148
Tabla 37. Priorización de intervenciones mediante criterio E/C para trazado propuesto en 2019	150
Tabla 38. Niveles de alerta en un SAT (adaptado de Aristizábal et al (2010)).....	170
Tabla 39. Límites de precipitación acumulada.....	172

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El Eje Vial No.4, en la provincia de Zamora Chinchipe en Ecuador conecta las poblaciones de Bellavista, Zumba y La Balsa. Este Eje busca mejorar la conectividad de la zona, así como también mejorar la integración fronteriza, beneficiando a Ecuador y Perú. La zona donde se ubica la vía está expuesta a fenómenos geofísicos e hidrometeorológicos, particularmente deslizamientos, inundaciones, sismos y descargas torrenciales (BID, 2003). En la base de datos de Desinventar, se registran entre los años 2000 y 2018 más de 1,600 deslizamientos y alrededor de 300 inundaciones en las Provincias de Loja y Zamora (Corporación OSSO, LA RED & UNISDR, 2019). En esta y otras zonas del país, hay evidencias que el cambio climático podría generar un aumento en las frecuencias y/o intensidades de las precipitaciones en la región exacerbando aún más el riesgo al que está expuesto la infraestructura de la vía (Germanwatch, 2019).

El presente proyecto pretende llevar a cabo una evaluación indicativa del riesgo ante eventos naturales para un proyecto de mejoramiento del Eje Vial No. 4 con base en el cual se puedan identificar los puntos y zonas críticas del proyecto, proponer medidas de mitigación del riesgo, evaluar las diferentes opciones de intervención, evaluar los costos preliminares de las obras requeridas y establecer las recomendaciones específicas para el diseño de la vía considerando aspectos de la gestión del riesgo ante eventos críticos de la naturaleza. En este análisis se evalúa la situación actual e histórica y la eventual situación luego de implementadas las medidas de mitigación propuestas, teniendo en cuenta además el efecto del cambio climático en las amenazas hidrometeorológicas.

En el primer capítulo del informe se presentan las generalidades; objetivos generales, el alcance, las limitaciones y la metodología utilizada. En el segundo capítulo se muestra un resumen de la información necesaria y recopilada, incluyendo las fuentes. En el tercer capítulo se detalla la información recopilada en campo, así como la interpretación de ésta con miras a identificar los puntos críticos de la vía ante diferentes condiciones de análisis. Simultáneamente explica la metodología para el análisis de amenazas (lluvia y sísmica) como posibles eventos detonantes de inestabilidad del terreno o descargas torrenciales y presenta mapas indicativos de susceptibilidad a deslizamientos, inundaciones y descargas torrenciales. El cuarto capítulo presenta el análisis de

vulnerabilidad que establece el orden de magnitud de los impactos de eventos de inestabilidad y descargas torrenciales en función de la intensidad de lluvia. Con base en esto se hacen las evaluaciones respectivas del riesgo y se presentan las diferentes opciones de medidas de mitigación tanto estructurales como no estructurales. También se presenta el análisis del riesgo en las condiciones actuales y luego de implementadas las medidas propuestas y las relaciones beneficio–costo correspondientes. Finalmente, el quinto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones para la implementación del estudio en el proceso de diseño final del tramo vial.

1.2 OBJETIVOS GENERALES

El objetivo principal de este estudio consiste en llevar a cabo una evaluación indicativa del riesgo ante eventos naturales para un proyecto de mejoramiento del Eje Vial No. 4, específicamente para las opciones de trazados del tramo entre Bellavista – Zumba y La Balsa, con base en el cual se puedan identificar los puntos y zonas críticas del proyecto, proponer medidas de mitigación del riesgo, evaluar las diferentes opciones de intervención, evaluar los costos preliminares para su eventual implementación y establecer las recomendaciones específicas para el diseño de la vía, considerando aspectos de la gestión del riesgo de desastres. El estudio considera la amenaza de lluvias incluyendo consideraciones de cambio climático, y la amenaza sísmica como eventuales detonantes de eventos críticos. Los resultados del estudio deben servir de guía para la toma de decisiones relevantes en el proyecto y para el ajuste requerido en las especificaciones de diseño y construcción del tramo vial, incluyendo la perspectiva de la gestión del riesgo ante eventos de la naturaleza, desde las fases iniciales de planeación y diseño del mismo.

Los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

- (i) Evaluación simplificada del riesgo de remoción en masa e inundaciones (incluyendo los efectos del cambio climático) en el área de intervención del proyecto que considera dos diferentes opciones de trazado y las condiciones generales de diseño previsto de la carretera. Se consideran tanto amenazas de origen geológico como de origen hidrometeorológico.

- (ii) Identificación de posibles medidas estructurales y no-estructurales para mitigar potenciales daños y pérdidas esperados en la infraestructura de transporte, su evaluación económica, de beneficio-costos y su priorización de acuerdo con criterios de riesgo y de costo-eficiencia.
- (iii) Proponer recomendaciones de los posibles ajustes requeridos en las especificaciones de diseño y construcción y los requerimientos de mantenimiento y operación de la infraestructura de transporte que puedan incorporarse en las fases de planeación y diseño de ingeniería del proyecto.

1.2 ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente estudio tiene un carácter de estudio indicativo, por lo cual no se presentan medidas de mitigación definitivas ni diseños a nivel de detalle. La información que se presenta debe servir como guía para identificar las zonas críticas, definir la conveniencia o no de un trazado determinado y evaluar preliminarmente la factibilidad de realizar obras de mitigación del riesgo para diferentes niveles de inversión. Con base en los resultados del estudio y una vez identificados y preseleccionados los posibles sitios críticos que pueden requerir intervención, el diseñador del tramo vial debería realizar estudios con mayor nivel de detalle que permitan llegar a la fase de diseños finales. Estos estudios deben incluir como mínimo, estudios geológicos, geotécnicos, topográficos, evaluaciones de estabilidad y diseños definitivos de obras de mitigación considerando la hidrología, la hidráulica, la geología, la geotecnia y el análisis y diseño estructural.

Los análisis llevados a cabo en este estudio tienen las siguientes limitaciones:

- Los modelos realizados se basan en la información existente recibida oficialmente por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) y el BID.
- La información que no fue suministrada por las agencias públicas fue obtenida de fuentes libres y abiertas de modelos regionales o locales.
- Los modelos están basados en modelos físicos y matemáticos usados en ingeniería para la evaluación simplificada y generalizada de las condiciones de estabilidad del terreno.
- Las obras propuestas son preliminares y tienen el carácter de indicativas. Pretenden establecer en términos generales el posible tipo de intervención y un costo aproximado para efectos de presupuestos y toma de decisiones en el proyecto. Con base en los resultados de

este estudio se deben identificar y seleccionar las zonas o puntos críticos de intervención y llevar a cabo estudios con mayor nivel de detalle para llegar a la fase de diseños.

1.3 ENFOQUE METODOLÓGICO

El presente análisis está dividido en tres fases principales. La primera fase de recopilación y organización de información, la segunda de evaluación de amenazas, identificación de sitios críticos y la tercera de identificación de alternativas de mitigación, evaluación del riesgo, valoración económica preliminar y análisis de beneficio costo. En la primera fase se realiza una revisión inicial de la información. Las actividades de esta fase se presentan en el capítulo dos.

La segunda fase del estudio corresponde a la evaluación de las amenazas, análisis de susceptibilidad, identificación y selección de puntos críticos. En esta fase se incluye el análisis de precipitaciones, incluyendo los efectos de cambio climático, los eventos sísmicos detonantes, el análisis de inundaciones y la identificación de puntos críticos por descargas torrenciales. Esta fase se presenta en el capítulo tres y cuatro.

Por último, en la fase tres se presenta la identificación de medidas de mitigación, la evaluación del riesgo, la valoración económica preliminar y de análisis beneficio – costo. En esta última se identifica el efecto de incluir las medidas de mitigación y los beneficios financieros generados. Se busca que las medidas planteadas generen una reducción del riesgo del estado actual como se puede ver en la Figura 1, como es evidente el riesgo no se puede reducir a cero, por lo tanto, se plantea un sistema de alerta temprana con el objetivo de mitigar el riesgo residual.

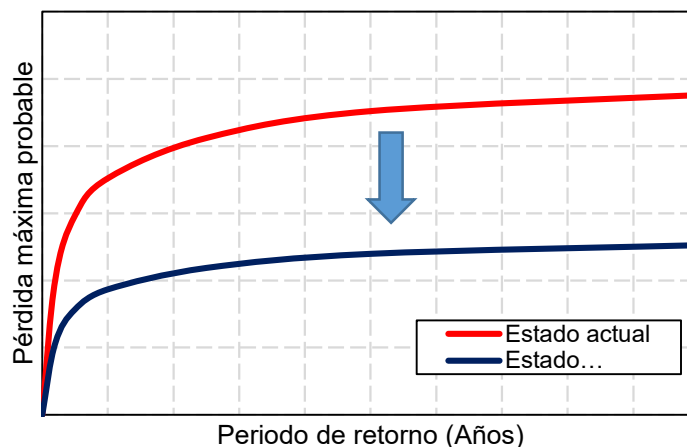


Figura 1. Marco conceptual de reducción del riesgo

Se presenta adicionalmente una comparación entre los diferentes trazados propuestos en los estudios de diseño realizados anteriormente. El resumen de la metodología se presenta en la Figura 1.

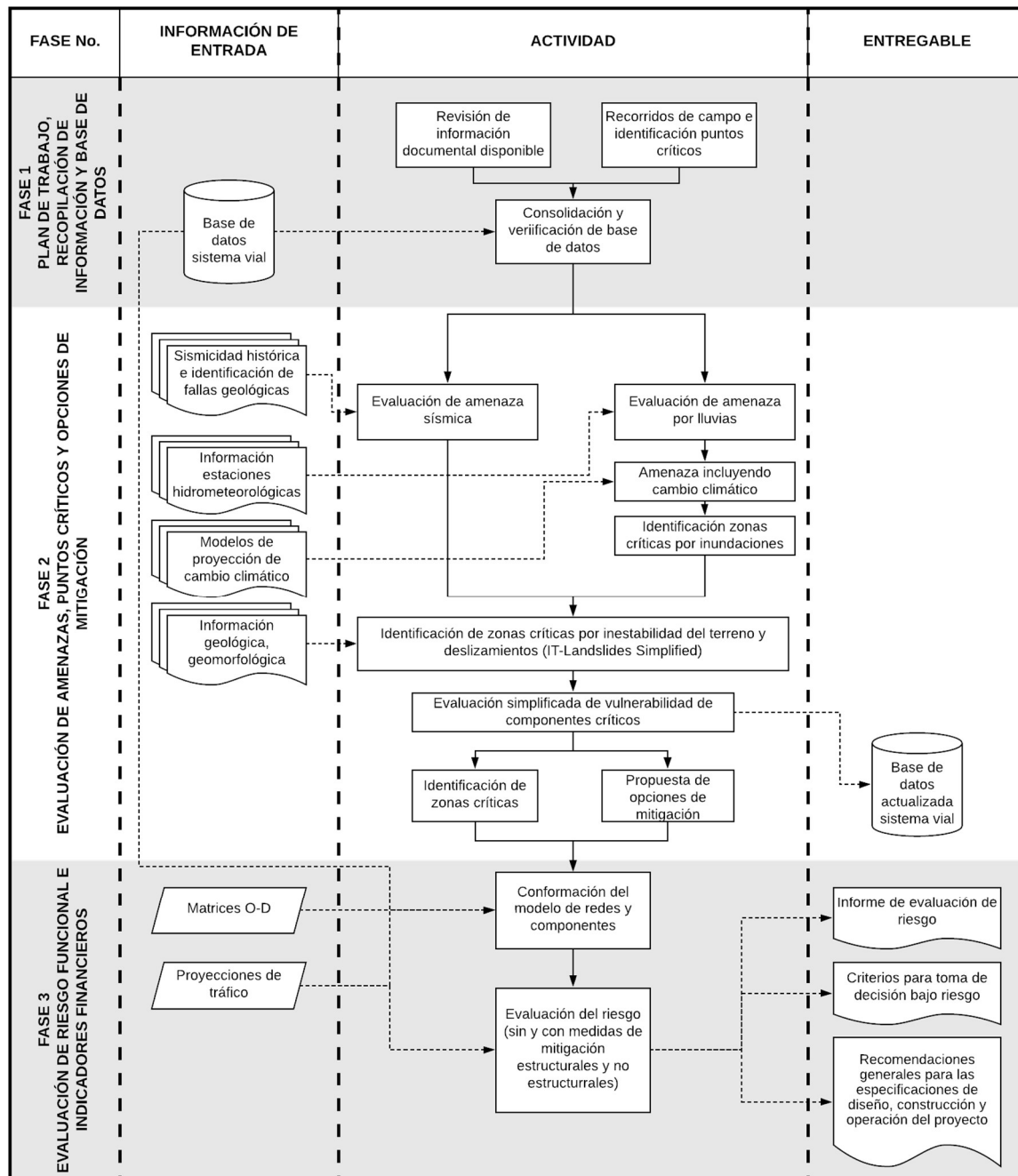


Figura 2. Enfoque metodológico operacional del presente estudio

2. INFORMACIÓN DISPONIBLE

2.1 ENTIDADES PARTICIPANTES Y CONSULTADAS

La recopilación de información se realiza con la coordinación del Banco Interamericano de Desarrollo – BID. Las entidades y ministerios consultados y que remitieron información son los siguientes:

- Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP)
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)

2.2 ESTUDIOS PREVIOS DE REFERENCIA

A continuación, se presentan de forma cronológica los estudios más relevantes de los que se tiene registro con relación al proyecto. La información contenida en los mismos ha servido de base para la realización del presente proyecto:

- **EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO PROBABILISTA Y DISEÑO DE PREFACTIBILIDAD DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN Y REFORZAMIENTO DE INFRAESTRUCTURA PARA LA MITIGACIÓN DE RIESGO SÍSMICO (BID-ITEC, 2021)**

Presenta el perfil de riesgo a nivel nacional de sectores de edificaciones e infraestructura. También presenta el diseño a nivel de prefactibilidad de medidas de mitigación del riesgo para cinco sectores: Educación, Hidrocarburos, Eléctrico, Salud y Transporte. Se utilizaron los modelos de amenaza generados, así como también datos de ocupación y condiciones del terreno a nivel nacional.

- **ESTUDIO DE RESILIENCIA PARA LA RED VIAL ESTATAL DEL ECUADOR (BID-AECOM, 2019)**

Este trabajo presenta análisis de la resiliencia de la red vial estatal del Ecuador para peligro de inundaciones, volcánico, sísmico y de movimientos en masa. La información obtenida y generada de este estudio fue utilizada para verificar la información existente y para la comparación de resultados.

2.3 INFORMACIÓN RECOPIADA

En la Tabla 1 se presenta la información general a nivel país suministrada por el MTOP y BID.

Tabla 1. Información básica recopilada

No.	NOMBRE	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	TIPO DE INFORMACIÓN
1	Trazado vía Actual	Tramo Loja – Ña Balsa	Shapes
2	Información GIS Cantonal Tramo 1	Acueducto, casas, cementerios, curvas de nivel, líneas de transmisión, poblados, ríos, etc. para el Tramo 1 (Vilcabamba, Valladolid, San Francisco de Vergel y Yangana)	Shapes
3	Estudio de factibilidad, impacto ambiental e ingeniería: Pre-preliminar, preliminar y definitivo de la Carretera Vilcabamba - Bellavista-Zumba-La Balsa, Tramo 2: Bellavista-Zuma-La Balsa.	Estudio de Factibilidad Estudio de Impactos Ambientales Estudio Pre-Preliminar 4.1 Línea de Gradiente 4.3 Polígono, Nivelación y Perfiles 4.2 Dibujo Topografía y Diseño Preliminar 4.4 Informe Preliminar Ingeniería 5. Estudio Ingeniería Definitivo 7. Obras Complementarias	Shapes, PDF, Word, Excel
4	Bellavista	Video Modelo 3D Tramo 2	MP4
5	Restitución Total	Restitución 3D del Tramo diseñado	DWG

La referencia 3 indicada en la Tabla 1 es el insumo principal del presente estudio. Esta información fue desarrollada en el 2012 como parte del estudio de diseño final del Tramo 2 desde Bellavista hasta La Balsa. En la Tabla 2 se detalla la información encontrada en esta referencia.

Tabla 2. Información estudio 2012

NOMBRE	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	TIPO DE INFORMACIÓN
1. Estudio de Factibilidad	Diagnóstico Socio Económico Estudio de Tráfico Presupuesto Base Viabilidad	PDF, Word, Excel
2. Estudio de Impactos Ambientales	Estudio de Impactos Ambientales (EIA) Anexos	Shapes, PDF, Word, Excel
3. Estudio Pre-Preliminar	Diseño y dibujo del anteproyecto Estudio Geológico y Geotécnico – Selección de ruta Estudio Cartas Topográficas Informe Selección de Rutas Restitución Aerofotogramétrica	DWG, PDF, Word, Excel

NOMBRE	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	TIPO DE INFORMACIÓN
4.1 Línea de Gradiente	Gradiente Vía Principal	DWG, Excel
4.2 Polígono, Nivelación y Perfiles	Libro Nivelación Tramo 2 Preliminar	DWG, Excel
4.3 Dibujo Topografía y Diseño Preliminar	Informe Preliminar Tramo 2 Preliminar	DWG, Excel
4.4 Informe Preliminar Ingeniería	Informe Preliminar Cantidades de Obra y Presupuesto Abscisado	Shapes, PDF, Word, Excel
5. Estudio Ingeniería Definitivo	Replanteo, Nivel y Perfil Transversal Estudio Geológico y Geotécnico Diseño y Dibujo Proyección Horizontal y Vertical Informe final Ingeniería Estudio Hidrológico e Hidráulico Estudio de Suelos Subrasante Estudio Sitios Taludes Inestables Sísmica Refracción Resistividad Eléctrica	Shapes, PDF, Word, Excel
7. Obras Complementarias	Seguridad y Señalización Vial Análisis, Evaluación, Especificación y Cantidades de Obra Mantenimiento Diseño Muros de Contención Levantamiento Expropiaciones	Shapes, PDF, Word, Excel
Otros	4TO Origen Destino Estadísticas Accidentes Proyecciones de Tráfico Mapas Geológicos Escala 2000	Shapes, PDF, Word, Excel

La Tabla 3 muestra la información obtenida directamente por la firma AECOM, relacionada con el proyecto indicado anteriormente.

Tabla 3. Información enviada por AECOM

NOMBRE (ARCHIVO)	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	TIPO DE INFORMACIÓN	FECHA DE RECOPIACIÓN	FUENTE DE LA INFORMACIÓN	DEPARTAMENTO
Estado RVE Diciembre 2018	Matriz que contiene a la Red vial estatal con sus características de la vía con una escala de calificación estimando Puntos Críticos y Escala	Archivo Excel - Matriz	28/01/2019	MTOP	Dirección de Conservación de Infraestructura del Transporte

NOMBRE (ARCHIVO)	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	TIPO DE INFORMACIÓN	FECHA DE RECOPIACIÓN	FUENTE DE LA INFORMACIÓN	DEPARTAMENTO
	IRI con estadísticas del estado de la red vial a Diciembre del 2018				
RVE noviembre 2018	Matriz que contiene a la Red vial estatal con sus características de la vía con una escala de calificación estimando Puntos Críticos y Escala IRI con estadísticas del estado de la red vial a Noviembre del 2018	Archivo Excel - Matriz	28/01/2019	MTOP	Dirección de Conservación de Infraestructura del Transporte
Susceptibilidad a Inundación	Información georreferenciada de zonas de inundación del Ecuador	Shapefiles - PDF	02/01/2019	SENPLADES	Información Geográfica
Puntos Críticos Noviembre 2018	Información geográfica de los puntos críticos de la RVE actualizado a noviembre del 2018	Shapefiles	18/01/2019	MTOP	Dirección de Gestión de Riesgos
1.- Plan de contingencia CONCEN-TRACIÓN MASIVA	Guía para elaborar planes de contingencia en eventos donde exista concentraciones masivas creando brigadas de prevención y respuesta (brigadas contraincendios, evacuación, seguridad física, atención pre hospitalaria).	PDF	15/11/2019	Secretaría de Gestión de Riesgos	Dirección General de Riesgos
Plan para Fenómeno El Niño 2015a	Planificación de medidas para mejorar la capacidad de respuesta ante el contingente y minimizar los efectos negativos del fenómeno del Niño.	PDF	15/10/2018	Secretaría de Gestión de Riesgos	Subsecretaría de Preparación y Respuesta ante Eventos Adversos
Plan-de-Respuestas-Ecuador	Plan Nacional de Respuestas ante Desastres de carácter	PDF	15/10/2018	Secretaría de Gestión de Riesgos	

NOMBRE (ARCHIVO)	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	TIPO DE INFORMACIÓN	FECHA DE RECOPIACIÓN	FUENTE DE LA INFORMACIÓN	DEPARTAMENTO
	natural o antrópicos estableciendo procedimientos y protocolos para la coordinación adecuada en las instituciones				
Plan_de_evacuación_Zamora	Plan de Evacuación para la Dirección distrital del MTOP de Zamora Chinchipe	PDF	15/10/2018	MTOP	Coordinación General de Planificación y Gestión Estratégica
Plan_de_contingencia	Plan de contingencia para afrontar una posible situación de emergencia sobre amenazas naturales o antrópica que afecten las vías en la temporada de lluvias para la dirección distrital del MTOP del Azuay.	Word	15/10/2018	MTOP	MTOP Azuay
Plan_de_CONTINGENCIA cañar_mtop	Plan de contingencias encaminado para la prevención, mitigación, control y respuesta a las contingencias para la época invernal de la red vial estatal.	Word	15/10/2018	MTOP	Dirección distrital del Cañar
PLAN DE REDUCCIÓN DE RIESGOS DEL SECTOR VIALIDAD Y TRANSPORTE_final	Documento que contribuye la reducción de riesgos de desastres a través del diseño de herramientas metodológicas e información básica que coadyuven al conocimiento sobre los riesgos de origen natural en el Sector Vialidad y Transporte y a la formulación de políticas	Word	15/10/2018	MTOP	Senplades

NOMBRE (ARCHIVO)	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	TIPO DE INFORMACIÓN	FECHA DE RECOPIACIÓN	FUENTE DE LA INFORMACIÓN	DEPARTAMENTO
	y estrategias para su gestión de riesgos.				
Estado RVE (folder)	Archivos que detallan los eventos adversos ocurridos el 2018 en la Red vial estatal y los montos de inversión para recuperar la vía de la emergencia. Archivo de información geográfica con los puntos críticos	Excel - SHP	15/10/2018	MTOP	Subsecretaria de Infraestructura del Transporte
SUSCETIBILIDAD ECUADOR.gdb	Geodatabase con información hidrogeológica, litología, pendientes, movimientos en masa, relieve, susceptibilidad y uso de cobertura del suelo	Geodatabase	15/10/2018	Instituto Geofísico	
ECUADOR_1000K_SMM	Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa del Ecuador Continental	PDF	15/10/2018	Instituto Geofísico	
Productos_inventario_georeferenciado.mdb	Información geográfica de accesos alcantarillado, bajantes, abscisado, capacidad de carga, centros de acopio, construcciones especiales, estaciones de pesaje, peaje, infraestructura vial, minas, parterre, paso peatonal, paso de frontera, puerto fluvial, túneles ferroviarios, vehiculares, zonas urbanas.	Geodatabase	15/10/2018	MTOP	

Adicional a la información anterior, la firma consultora Constructora Cordero, que se encuentra actualmente desarrollando los estudios a nivel de diseño final del proyecto de mejoramiento de la Eje Vial 4 del MTOP, compartió la información indicada en la Tabla 4.

Tabla 4. Información recopilada por el contratista diseñador

No.	NOMBRE	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	TIPO DE INFORMACIÓN	FECHA DE RECOPIACIÓN
1	Tramo Bellavista El Progreso	Fotografías aéreas y Modelo de Elevación Digital	Ortofotos y Raster	26/06/2019
2	Trazado Final Eje Vial 4	Trazado Final 2019	Shape	05/07/2019
3	Tramo completo	Fotografías aéreas y Modelo de Eleveación Ditial (DEM sólo en una parte del trazado)	Ortofotos y Raster	16/07/2019
4	Mapa Geológico	Mapa geológico generado por el contratista	PDF, png y shp	12/08/2019

Adicionalmente se consultó información libre de las siguientes entidades:

- Instituto Nacional de Metodología e Hidrología del Ecuador– INAMHI
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENHAMI
- Ministerio de Agricultura y Ganadería – MAG
- Ministerio del Ambiente de Ecuador
- Ministerio del Ambiente de Perú
- Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias – SNGRE
- Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC
- University of Alaska Fairbanks – UAF
- Japan Agency Exploration Agency – JAXA
- U.S. Geological Survey – USGS
- National Aeronautics and Space Administration - NASA

3. INESTABILIDAD DEL TERRENO, INUNDACIONES Y DESCARGAS TORRENCIALES

3.1 TRAMOS Y TRAZADOS DE ANÁLISIS

El tramo de análisis del presente proyecto es la vía que conecta a Bellavista con la Balsa, en la provincia de Zamora-Chinchipe. Esta vía es de gran importancia para el país pues permite una integración regional e internacional de los pueblos fronterizos. El primer diseño del trazado de esta vía se realizó en 2002, el segundo en 2012 y en 2019 se desarrolló un tercer estudio. El trazado 2002 corresponde a el trazado de la vía actual, mientras que los trazados propuestos en 2012 y 2019 presentan importantes variantes con respecto a este. En la Figura 3 se presentan los trazados 2012 y 2019 sobre la vía actual, como se puede identificar, el trazado propuesto en 2019 comparte un mayor porcentaje del trazado con el actual. Este estudio presenta una comparación entre los trazados propuestos en 2012 y 2019 desde el punto de vista de la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD). El trazado 2002 no se consideró en el análisis pues no cumple con las condiciones geométricas requeridas actualmente por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP).

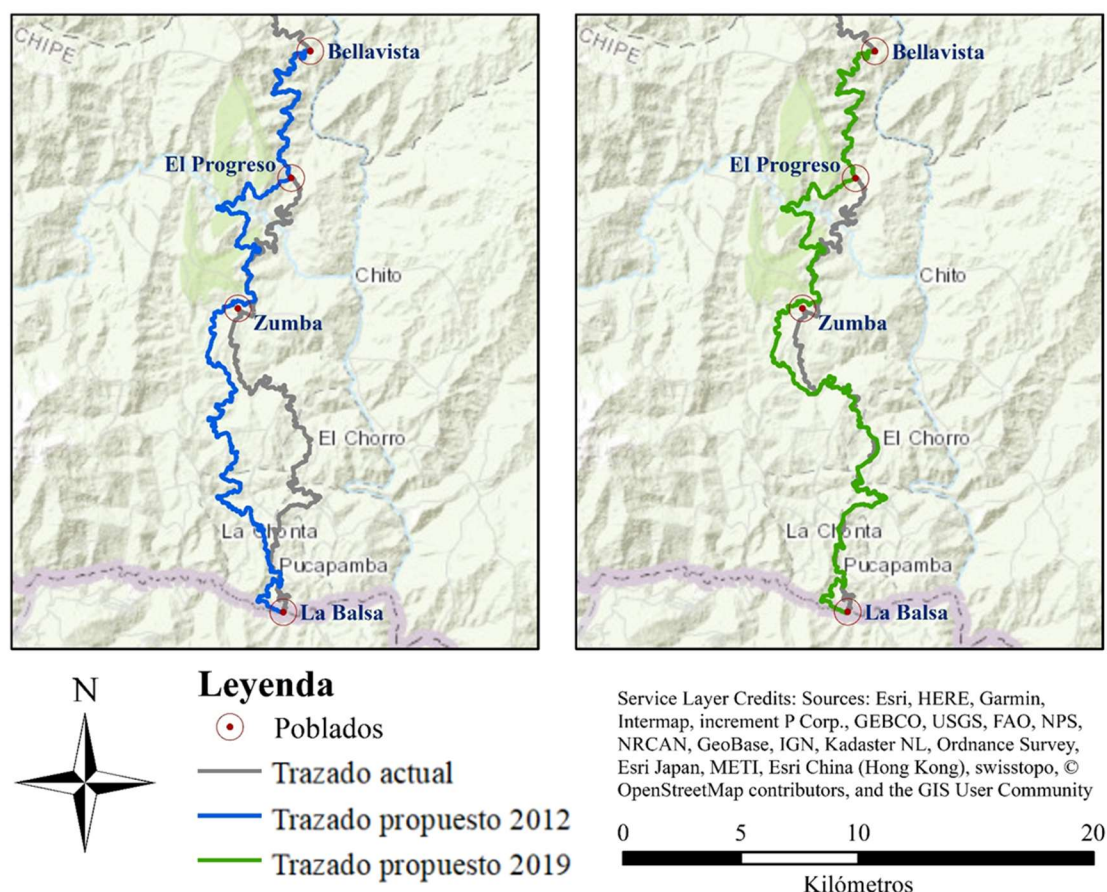


Figura 3. Trazados analizados. Fuente: elaboración propia

3.2 RECONOCIMIENTO EN TERRENO DE LA VÍA

La primera actividad del estudio consistió en realizar un reconocimiento de la vía realizado el mes abril de 2019. El principal objetivo de esta actividad fue realizar un reconocimiento geológico e identificar las zonas y eventos críticos en el tramo entre Bellavista y La Balsa (Tramo 2). Sin embargo, con el fin de comprender más de fondo la problemática de la zona, se decidió ampliar el recorrido al tramo entre Vilcabamba y Bellavista (Tramo 1), sector que presentan diferentes problemáticas de inestabilidad y descargas torrenciales, algunas de las cuales podrían ser similares a las del nuevo tramo de estudio. En la Figura 4 se presenta un esquema de las poblaciones más importantes por las cuales pasan los Tramos 1 y 2.

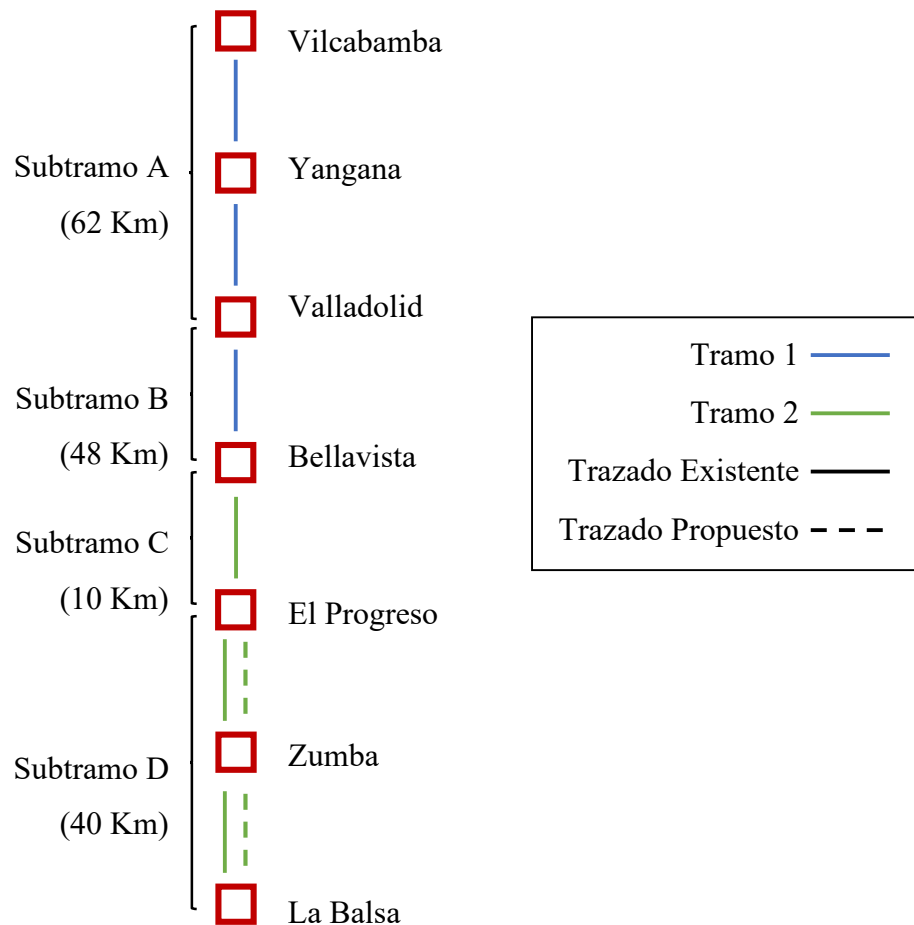


Figura 4. Esquema tramos visitados. Fuente: elaboración propia

A continuación, se realiza una descripción de cada uno de los tramos:

- **Tramo 1:** corresponde a la vía entre Vilcabamba y Bellavista. Este tramo está construido principalmente en pavimento rígido en buen estado, aunque presenta algunos tramos sin pavimento. Geológicamente se puede dividir en dos subtramos. El primero (Subtramo A) entre Vilcabamba y Valladolid donde predominan las rocas sedimentarias conformadas por conglomerados, areniscas y lutitas donde hay manifestaciones de procesos erosivos en forma de surcos y cárcavas. Estos procesos generan pequeños taponamientos en las cunetas interiores y han sido mitigados parcialmente en algunos puntos con protecciones de malla y concreto lanzado. Eventualmente se encuentran muros en concreto reforzados de 1.5 a 2.0 metros de altura en pequeños tramos (<60m de longitud). Al final del subtramo entre Yangana

y Valladolid no se encuentran protecciones de taludes por lo cual existen unos focos inestables sin tratamiento. El segundo subtramo (B) es entre Valladolid y Bellavista donde predominan rocas graníticas que han generado suelos residuales limo-arenosos en los taludes interiores. En esta zona se han generado fenómenos de remoción en masa donde predominan los deslizamientos remontantes complejos de gran magnitud y procesos de erosión que generan taponamientos en puentes y en algunos focos de aproximadamente 100 metros de ancho. Se identificaron de 50 a 70 deslizamientos de carácter crítico en este tramo. El tratamiento en estos puntos ha estado enfocado principalmente en el retiro de los flujos y escombros que taponan la banca. Así mismo se encontró la presencia de descargas torrenciales en puntos que taponan la vía y requieren remoción de escombros permanente en épocas invernales. En este subtramo no se observan obras de contención ni estructuras de cruce que evacúen los caudales y descargas. En la Figura 5 se incluyen algunas fotografías ilustrativas de la problemática que se presenta en esta vía.





Figura 5. Fotografías Tramo 1. Fuente: Original

- **Tramo 2:** Corresponde a la vía entre Bellavista y La Balsa. Este tramo se puede dividir geológicamente en dos subtramos. El primero (subtramo C) entre Bellavista y El Progreso, en general tiene características similares al subtramo B. El segundo subtramo (D) está entre El Progreso y La Balsa. El diseño proyectado de la nueva vía se aparta de la ruta existente. Los tipos de roca identificados durante el

reconocimiento se distribuyen de la siguiente forma: filitas y cuarcitas entre El Progreso y Zumba y a partir de Zumba hasta La Balsa predominan las rocas sedimentarias constituidas por areniscas, conglomerados y lutitas con algunos depósitos de ladera y la presencia de deslizamientos remontantes observados en acercamientos del tramo proyectado a la vía existente. En imágenes satelitales es posible identificar focos inestables que afectan el corredor del alineamiento proyectado. Vale la pena destacar la existencia de un proyecto de relieve escarpado en los últimos seis kilómetros en donde el diseño geométrico muestra curvas regresivas que se ven afectadas por deslizamientos de gran magnitud. En la Figura 6 se pueden identificar fotografías del tramo 2.





Figura 6. Fotografías Tramo 2. Fuente: Original.

3.3 RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO

3.3.1 Geología General Trazado propuesto en 2012

A partir de las observaciones geológicas llevadas a cabo en la misión de reconocimiento y la interpretación de las fotografías aéreas de la vía entre Bellavista y La Balsa se puede determinar que la zona está conformada por tres (3) unidades rocosas así:

1. El tramo de Bellavista - El Progreso, está conformado por rocas de tipo granítico, con horizontes importantes de meteorización que favorecen la generación de deslizamientos complejos de tipo remontante que pueden observarse en la vía construida.
2. El tramo entre las cercanías de El Progreso y Zumba está conformado por rocas metamórficas de tipo esquisto y pizarra que, aunque los horizontes de meteorización son menores al tramo anterior, han generado algunos depósitos de ladera (coluviones y zonas de reptación), así como zonas de flujos de tierra.
3. Al costado N-E del casco urbano de Zumba se presenta un escarpe que puede estar asociado a un lineamiento de falla que pone en contacto las rocas metamórficas con un conjunto de areniscas, conglomerados y algunas intercalaciones de arcillolita. En esta unidad se han desarrollado depósitos de ladera, flujos de tierra y superficies de reptación. También se pueden generar deslizamientos en roca de tipo planar y complejos.

En la Figura 7 se presenta la interpretación fotográfica realizada en donde se ilustran los sitios críticos identificados. Estos sitios fueron identificados a partir de las formaciones geológicas a diferentes escalas, los drenajes existentes y el tipo de vegetación y sus características entre otras características. En el Anexo 1 se presenta en detalle las interpretaciones realizadas a partir de las imágenes aéreas.







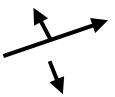
LEYENDA:

QD	Cuerpo Deslizante
Qc	Coluvión
Qft	Flujos de Tierra
B	Disposición de Sobrantes
R	Reptación
Dt	Descargas Torrenciales

Unidades Geológicas:

G	Rocas Graníticas
G+E	Rocas Graníticas y Esquistos
E	Esquistos
A+C	Areniscas y Conglomerados

CONVENCIONES:

	Límite de Procesos		Buzamiento Fotogeológico
	Escarpes de Deslizamientos		Drenaje
	Lineamiento de Falla		Reptación
	Posible Eje Anticlinal Buzante		



K0+000 – K5+000



K5+000 – K9+000



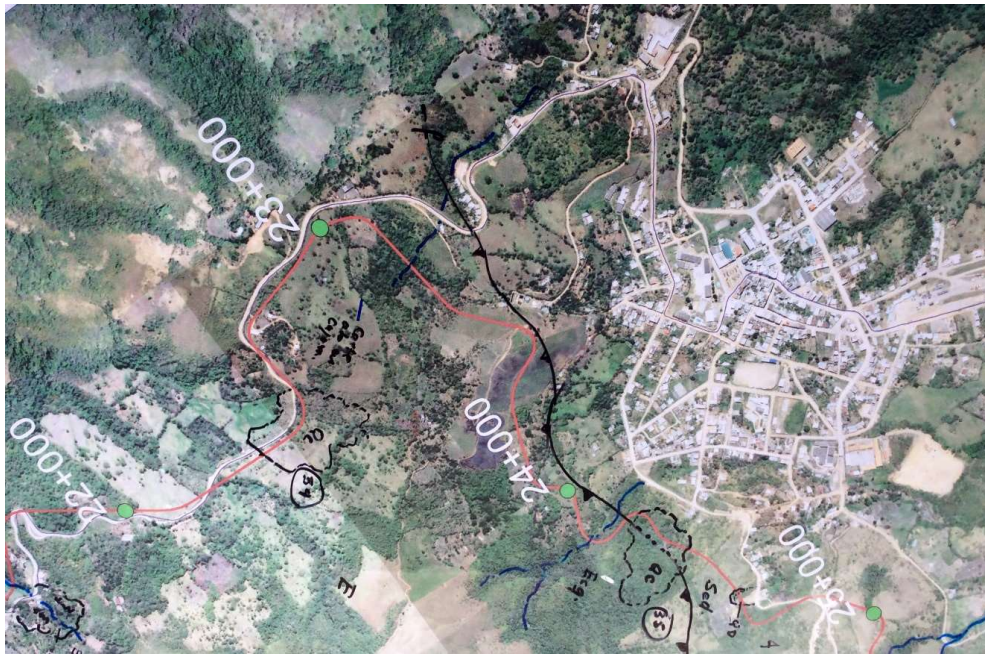
K9+000 – K13+000



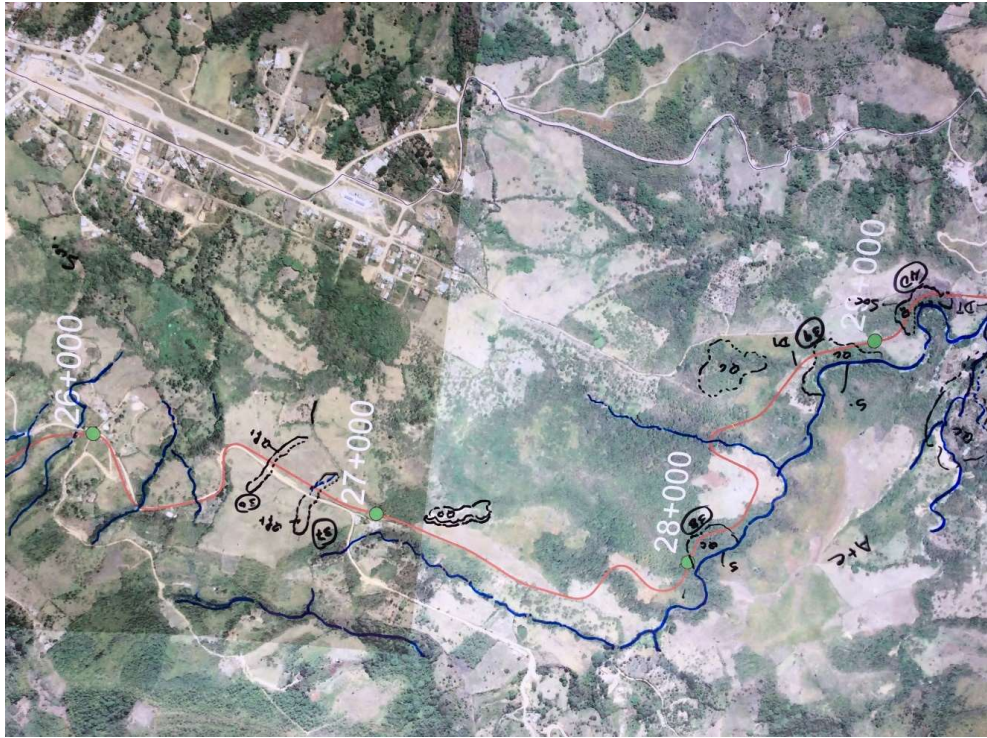
K13+000 – K18+000



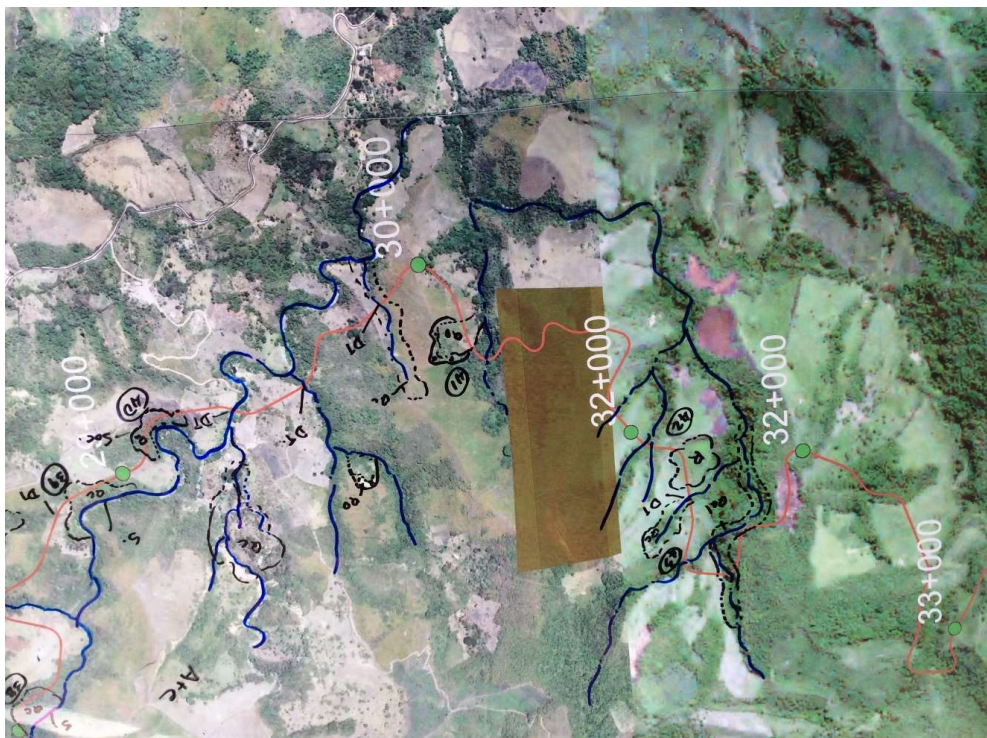
K18+000 – K22+000



K22+000 – K25+000



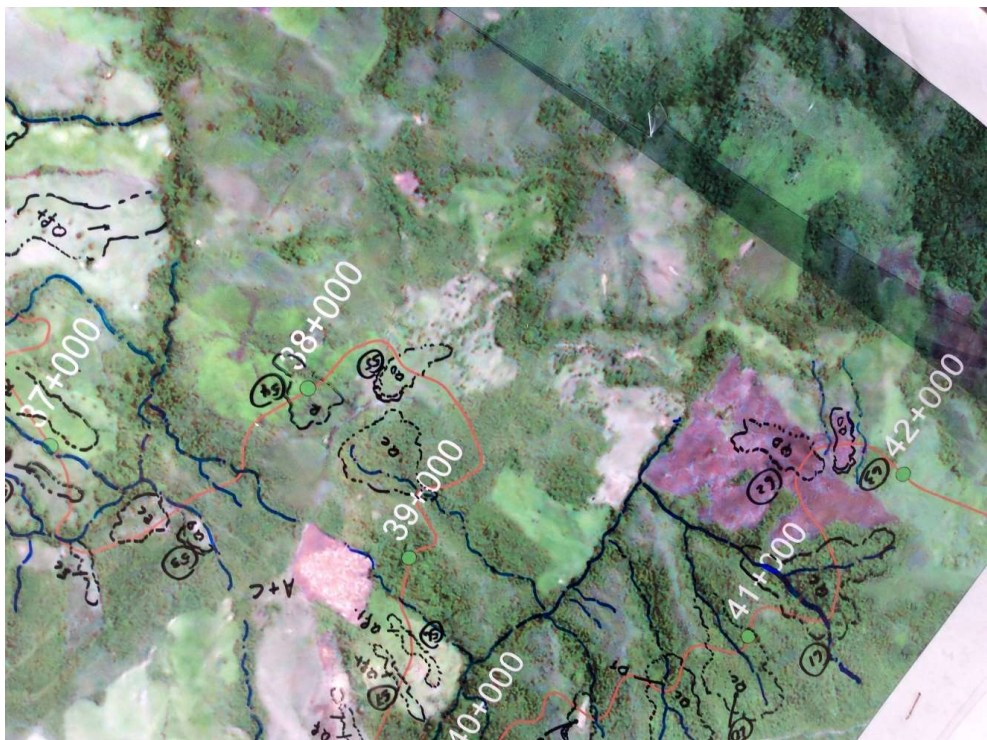
K26+000 – K29+000



K29+000 – K33+000



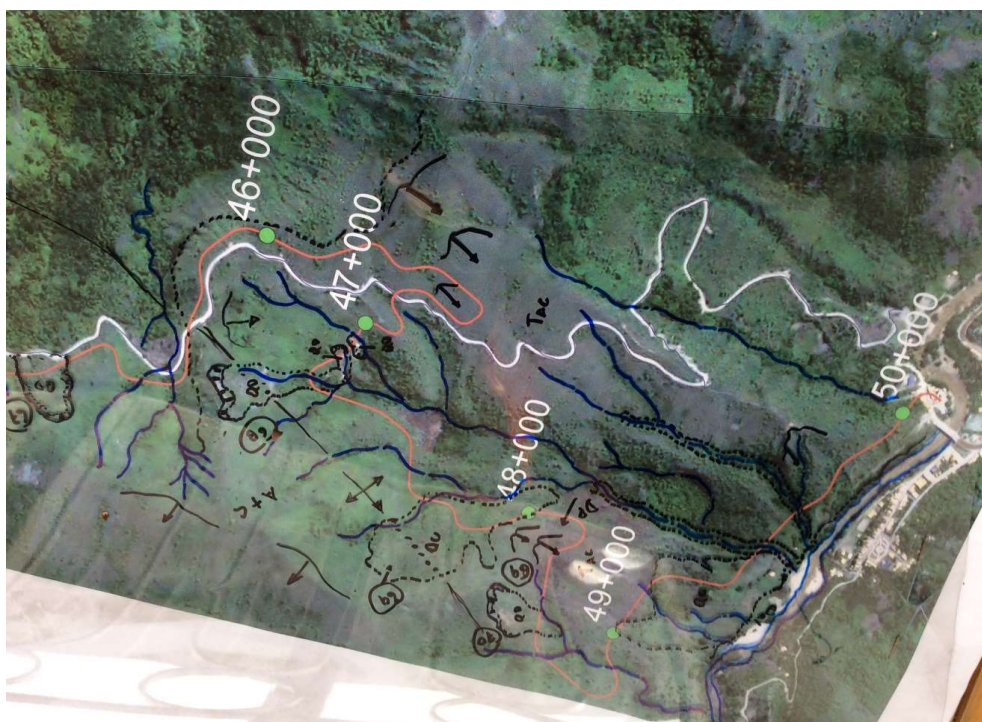
K33+000 – K37+000



K37+000 – K42+000



K42+000 – K46+000



K46+000 – K50+000

Figura 7. Interpretación de fotografías aéreas Trazado propuesto en 2012. Fuente: Original, basada a las fotografías aéreas tomadas de Google Maps.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los fenómenos de remoción activos y potenciales que se han identificado a partir de las imágenes disponibles y las misiones de reconocimiento.

Tabla 5. Sitios potencialmente inestables y condiciones estimadas de materiales - Trazado propuesto en 2012

POLÍGONO	TIPO	MATERIAL	COHESIÓN (Kpa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN	DENSIDAD SATURADA KN/m³	ESPESOR (m)
1,2,3,4,5 ^a ,5b, 7,8,9,10,11,1 2,13,14	Deslizamiento Remontante	Suelo Residual y granito Alterado	0-90	24-45	20	10
6	Cárcava	Suelo Residual y granito Alterado	0-90	24-45	20	10
15,16,17	Deslizamiento Remontante	Suelo Residual y granito Alterado	0-90	24-45	20	10
18,19,20,21, 22,23,24,25, 27	Deslizamiento Remontante	Suelo Residual y granito Alterado	0-90	24-45	20	10
26	Coluvión	Coluvión Arcilloso	30-70	22-30	22-32	20
28, 29 ^a	Coluvión	Coluvión Arcilloso	30-70	22-30	22-32	20
29 31	Reptación	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	
32	Coluvión	Coluvión Arcilloso	30-70	22-30	22-32	20
33	Deslizamiento Remontante	Suelo Residual y granito	0-90	24-45	20	10
34,35	Coluvión	Coluvión Arcilloso	30-70	22-30	22-32	20
36,37	Flujo de Tierra	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	
38,39 y40	Coluvión	Coluvión Arcilloso	30-70	22-30	22-32	20
41	Deslizamiento Remontante	Areniscas	1000- 2000	25-30	17-23	8
42	Reptación	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	4
43	Coluvión	Coluvión Arenoso	--	38-45	21	
44	Reptación	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	4
45	Deslizamiento remontante	Areniscas	1000- 2000	25-30	17-23	8
46	Coluvión	Coluvión Arenoso	--	38-45	21	
47,48	Deslizamiento Remontante	Areniscas	1000- 2000	25-30	17-23	8
49,50,52	Flujo de Tierras	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	5

POLÍGONO	TIPO	MATERIAL	COHESIÓN (Kpa)	ANGULO DE FRICCIÓN	DENSIDAD SATURADA KN/m ³	ESPESOR (m)
51	Reptación	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	4
53,55	Deslizamiento Remontante	Areniscas	1000-2000	25-30	17-23	8
54	Reptación	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	4
56, 58 y 59	Flujo de Tierras	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	5
60	Coluvión	Coluvión Arenoso	--	38-45	21	20
61	Coluvión	Coluvión Arenoso	--	38-45	21	20
62 y 63	Deslizamiento Remontante	Areniscas	1000-2000	25-30	17-23	8
64	Coluvión	Coluvión Arenoso	--	38-45	21	20
65 y 66	Deslizamiento Remontante	Areniscas	1000-2000	25-30	17-23	8
67 y 68	Deslizamiento Remontante	Areniscas	1000-2000	25-30	17-23	8
69	Planar	Areniscas	1000-2000	25-30	17-23	8

3.3.2 Geología general Trazado propuesto en 2019

En este numeral se presenta el análisis geológico a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas y de la visita de reconocimiento para la variante del trazado propuesto en 2012.

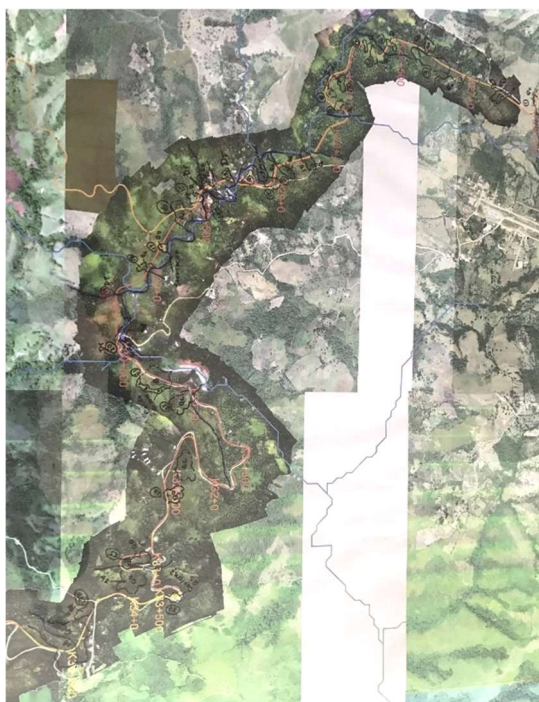
Teniendo en cuenta algunos rasgos sobre las imágenes y el reconocimiento de campo preliminar en la zona se encuentra un conjunto de rocas sedimentarias donde predominan las areniscas y conglomerados con intercalaciones de arcillolitas, las cuales han sido plegadas y falladas, así como la influencia de la meteorización que han desarrollado suelos residuales principalmente arenosos.

Desde el punto de vista geomorfológico predominan dos tipos de paisaje, siendo el denudacional el más frecuente, pero también se han logrado identificar procesos de erosión y fenómenos de remoción.

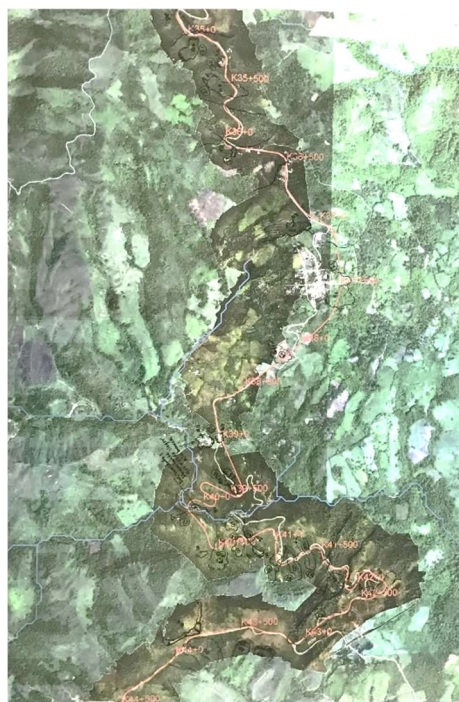
De acuerdo con lo anterior, en la zona predominan los cortes en suelos arenosos y roca fracturada. La unidad sedimentaria también ha estado sometida a procesos de remoción en masa en donde predominan los deslizamientos remontantes, reptación, algunos flujos de

tierra y deslizamientos planares. Se destaca además la presencia de depósitos de ladera, conformados por bloques subredondeados y angulares embebidos en una matriz arenosa, los cuales han sido diferenciados como coluviones. Estos procesos han sido agrupados en la Tabla 6, donde se acompañan algunas propiedades aproximadas.

Tanto la información de la fotointerpretación como las propiedades deberán ser verificadas en los estudios más detallados. En la Figura 8 se puede identificar la interpretación fotográfica realizada para la identificación de sitios críticos, basada en los mismos criterios mencionados anteriormente. Vale la pena aclarar que dado que se tenían imágenes de mejor resolución en este caso fue posible hacer una interpretación de mayor calidad.



K27+000 – K34+500



K34+500 – K44+500



K44+500 – K52+500

Figura 8. Fotografías de interpretación fotográfica de fotografías aéreas Trazado propuesto en 2019.
Fuente: Original, basada a las fotografías aéreas tomadas de Google Maps.

En la Tabla 6 se presenta el resumen de los sitios críticos donde se identifican fenómenos de remoción activos y potenciales que se han interpretado en las imágenes disponibles.

Tabla 6. Sitios potencialmente inestables y condiciones de materiales - Trazado propuesto en 2012

POLÍGONO	TIPO	MATERIAL	COHESIÓN (Kpa)	ANGULO DE FRICCIÓN	DENSIDAD SATURADA KN/m ³	ESPESOR (m)
1, 3, 10, 11, 12, 16, 18, 21, 22, 28, 33, 38, 42, 43, 44, 45, 46, 54 y 55	Coluvión	Coluvión Arenoso	--	38-45	21	
1A, 2, 7, 27A, 34	Flujo de Tierra	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	5m
4, 5, 6, 8, 9 y 15	Reptación	Suelo arcilloso	10-30	12-16	14	4m
14, 17, 23, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 39, 41, 49, 50, 51, 52	Deslizamiento Remontante	Areniscas	1000-2000	25-30	17-23	8
47, 53	Planar	Areniscas	1000-2000	25-30	17-23	8

En cuanto al trazado propuesto en 2019 desde Bellavista hasta La Balsa, se tiene en resumen las siguientes condiciones geológicas (identificadas a partir de las inspecciones realizadas en campo y de la información suministrada por la consultora como se identifica en la Tabla 4):

K0+000 - K11+000, presencia de granitos con niveles de meteorización profundos donde son frecuentes los procesos de deslizamientos remontantes y erosión principalmente en forma de surcos y cárcavas a lo largo de los taludes existentes de la vía. Así mismo hay presencia de descargas torrenciales en los cauces de los drenajes más importantes.

K11+000 - K13+000, existe una zona de transición entre granitos meteorizados y esquistos también alterados donde posiblemente se encuentren algunos cuerpos intrusivos y lentes de esquistos.

K13+000 - K24+000, se presentan suelos residuales de esquistos en donde predominan fenómenos de remoción tales como deslizamientos remontantes y reptación.

K24+000 - K52+000, se presentan unidades de roca sedimentaria conformadas principalmente por areniscas, conglomerados y algunos niveles de arcillolitas en donde son frecuentes los deslizamientos remontantes, reptación y procesos de socavación.

3.3.3 Resumen resultados

Después de la realización de la fotointerpretación se tienen 81 puntos críticos para el trazado propuesto en 2012 y 83 puntos críticos identificados en el trazado propuesto en 2019. Estos se pueden identificar en la Figura 9.

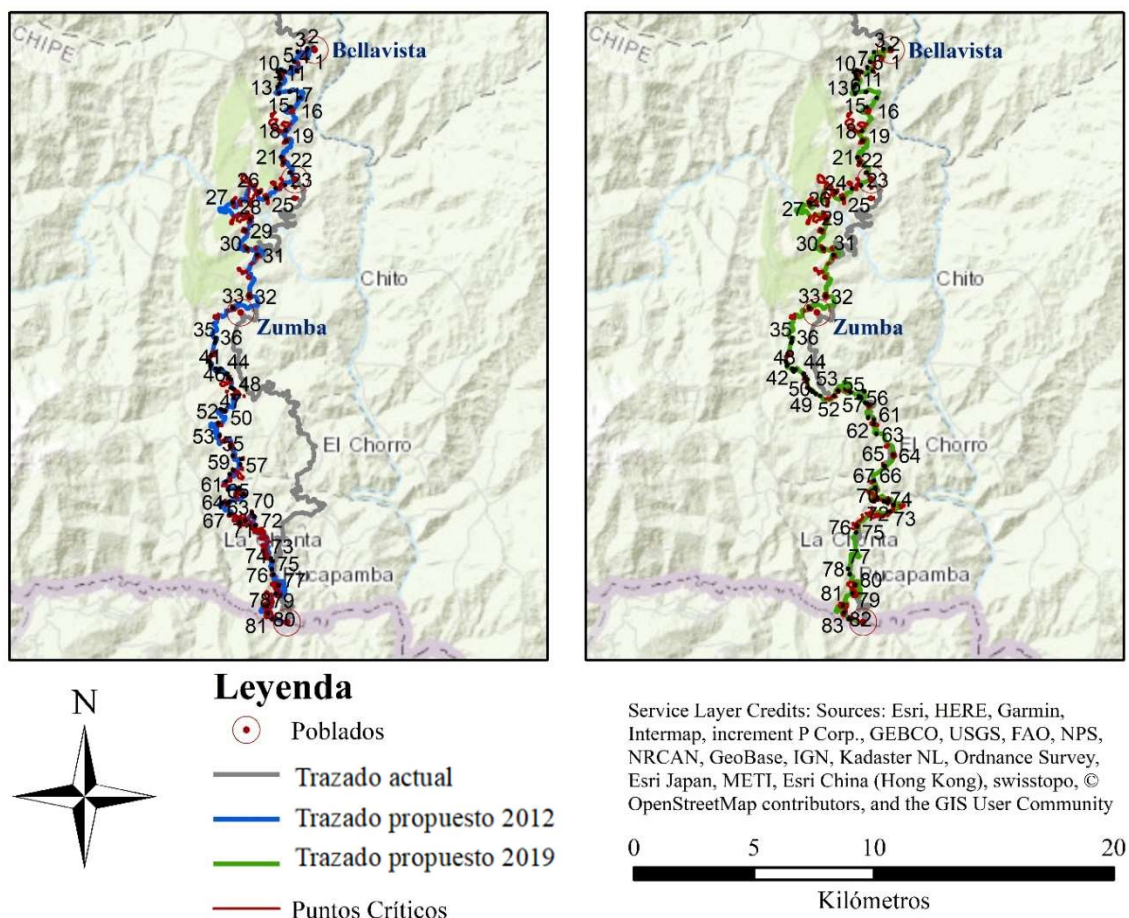


Figura 9. Puntos críticos identificados en los trazados. Fuente: elaboración propia.

3.3.4 Registro fotográfico y tipos de procesos

En la Figura 10 se presenta un registro fotográfico de los procesos y tipos de materiales a intervenir en la zona del proyecto.



Se ilustra el proceso de deslizamientos remontantes en suelos residuales y horizontes meteorizados de rocas graníticas para el tramo comprendido entre Bellavista y alrededores de El Progreso



Siguiendo el trazo proyectado entre El Progreso y Zumba se observan actualmente deslizamientos espontáneos que indican la susceptibilidad a procesos de remoción en los esquistos que generan suelos lateríticos



Afloramiento de esquistos en la Cuenca del río Isimanchi



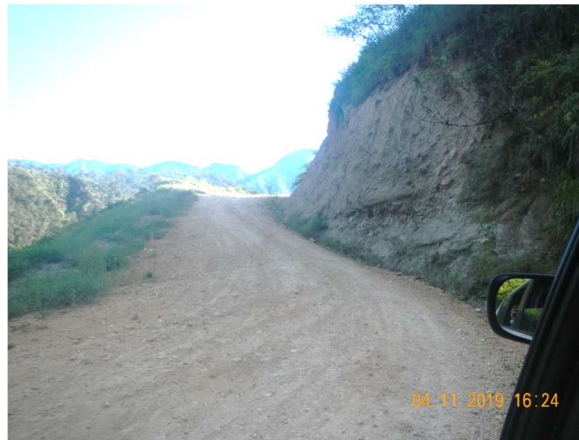
Descargas torrenciales y palizadas comunes en prácticamente todo el sector donde existen cruces de drenajes importantes



Afloramiento de conglomerados formando taludes verticales entre las localidades de El Chorro y Pucabamba en la vía actual



Cuerpo deslizante en la vía actual que afectará el proyecto entre el K45 y K46



Cortes en estratos de areniscas con intercalaciones de conglomerados sobre la vía actual en la ladera norte del río Canachis en la vía actual

Figura 10. Registro fotográfico de procesos y tipos de materiales

3.4 AMENAZA DE LLUVIA

En este numeral se expone de manera breve la metodología, los insumos y los resultados de la evaluación de la amenaza por lluvias para la zona de estudio de las dos opciones de la vía, considerando que el resultado es un insumo crítico como factor detonante para el análisis de inestabilidad del terreno y de descargas torrenciales. Adicionalmente, se detalla la metodología y resultados de la incorporación de los efectos del cambio climático en la alteración de intensidades y frecuencias de los eventos extremos de lluvia representativos.

3.4.1 Metodología

Para la evaluación de la amenaza de lluvias como detonante de eventos de inestabilidad del terreno y deslizamientos se emplea una metodología probabilista que tiene como base la información disponible de lluvia mensual acumulada de las estaciones disponibles en la zona de estudio. Es importante aclarar que esta información es adecuada para el modelo simplificado desarrollado en el presente estudio, sin embargo, para estudios más detallados es necesario contar con información de mayor resolución (diaria y horaria). Con esta información se busca establecer las intensidades y las frecuencias de ocurrencia de eventos extremos máximos de precipitación y de este modo contemplar el espectro más crítico de posibilidades.

Los pasos principales para el desarrollo del modelo de amenaza de lluvia son los siguientes:

1. Recopilación de información meteorológica disponible en la zona de estudio.
2. Análisis e interpretación de toda la información de lluvias a escala mensual. En esta etapa se seleccionan las estaciones que tengan una completitud de datos adecuada (más del 85%) y un periodo concurrente de análisis (ver Tabla 7).
3. Para las estaciones seleccionadas se realiza un filtro de datos atípicos uno a uno, se completan los datos faltantes con la técnica más adecuada para el caso particular (razón normal, razón q, método NR, entre otros) y finalmente se homogeneizan los datos (análisis de doble masa, aplicación del SNHT, etc.).
4. Evaluación estadística de datos para generar información a nivel mensual, estacional, anual y para caracterizar el régimen meteorológico de la zona. Con esta información se generan mapas de isohietas para detectar variaciones espaciales.
5. Análisis de valores extremos máximos mensuales de lluvia. Para cada estación se realiza un análisis de frecuencia mediante la asignación y selección de una función de probabilidad. Se ajustan diferentes funciones como la Gumbel, Weibull, Gamma, entre otras y se selecciona aquella con el mejor ajuste en cada caso (pruebas como Kolgomorov-Smirnov modificado, AIC, BIC, etc.). Para más información ver: (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012; Myatt & Johnson, 2014)
6. Generación de mapas probabilistas de amenaza por lluvia para diferentes periodos de retorno mediante las funciones de probabilidad calculadas en el paso anterior y la interpolación de los resultados.

La variabilidad de los campos de precipitación en la zona de análisis se considera mediante el uso de un archivo tipo “.AME” (formato compatible con la plataforma CAPRA), el cual contiene toda la información relevante sobre los escenarios. Para más información sobre estas metodologías de análisis o del software utilizado en los análisis se refiere al lector a la plataforma CAPRA (www.ecapra.org).

El análisis descrito se realiza con la ayuda del siguiente programa de computador:

- Análisis de información pluviométrica: Software *IT-Precipitación*.

3.4.2 Información base

La Tabla 7 resume la información disponible para el análisis de lluvia en el tramo de estudio con escala temporal mensual. La tabla indica para cada una de las estaciones pluviométricas el país y la entidad fuente de los datos, la ubicación georreferenciada y los periodos de tiempo en que se cuenta con información.

Tabla 7. Estaciones pluviométricas y periodos de tiempo con información disponible

Código	Nombre	País Entidad	Longitud (°)	Latitud (°)	Elevación (m.s.n.m)	Información disponible	
						Desde	Hasta
1	Amaluza	Ecuador INHAMI	-79.431	-4.585	1,672	01/01/1990	31/12/2013
2	El Lucero	Ecuador INHAMI	-79.472	-4.400	1,180	01/01/1990	31/12/2013
3	El Pangui	Ecuador INHAMI	-78.675	-3.933	820	01/01/1990	31/12/2013
4	Jimburá	Ecuador INHAMI	-79.465	-4.628	2,100	01/01/1990	31/12/2013
5	Yangana	Ecuador INHAMI	-79.175	-4.368	1,835	01/01/1990	31/12/2013
6	Sondorillo	Perú SENHAMI	-79.431	-5.340	1,917	01/10/1963	30/09/2018
7	Chontalí	Perú SENHAMI	-79.090	-5.644	1,626	01/11/1963	31/01/2019
8	Hacienda Shumaya	Perú SENHAMI	-79.361	-5.367	1,991	01/11/1963	31/01/2019
9	Tuluze	Perú SENHAMI	-79.347	-5.477	2,233	01/10/1963	31/01/2019
10	Sallique	Perú SENHAMI	-79.313	-5.659	1,804	01/09/1963	28/02/2019
11	Ayabaca	Perú SENHAMI	-79.711	-4.638	2,633	01/01/1963	14/05/2019
12	Sausal de Culucán	Perú SENHAMI	-79.758	-4.752	997	01/01/1963	30/09/2018

Los datos de las estaciones anteriores fueron revisados, completados y homogeneizados para el periodo comprendido entre 1990 y 2013. Se eligió este periodo de tiempo por contar con la mayor cantidad de datos continuos y de manera concurrente en todas las estaciones como se presenta en la Figura 11. Se revisaron y filtraron los datos atípicos registrados por medio del método de Grubbs (Grubbs, 1969).

Por otra parte, los datos faltantes se completaron con el método de la razón que al ser un análisis a nivel mensual y por contar siempre por lo menos con 2 estaciones cercanas para

rellenar los datos de la faltante. Por último, para homogeneizar los datos durante los años de análisis se empleó el análisis clásico de doble masa (Dahmen & Hall, 1990). Los datos procesados fueron los empleados para las evaluaciones posteriores.

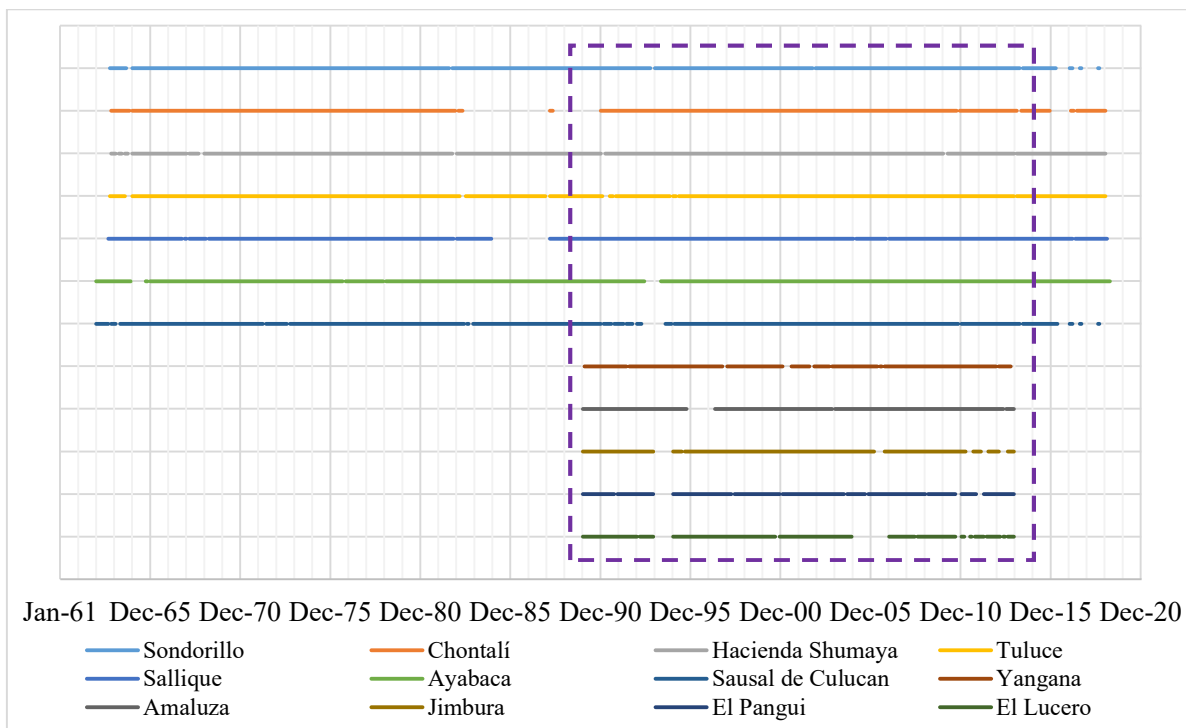


Figura 11. Disponibilidad de datos por estación y periodo seleccionado de análisis

En la Figura 12 se resumen los registros de profundidad promedio mensual multianual simple de lluvia en las estaciones pluviométricas de manera conjunta. Es de notar el régimen unimodal de la zona que se caracteriza por una temporada lluviosa comprendida entre octubre y mayo con pico promedio en el mes de marzo de 180 mm/mes, mientras la temporada seca se desarrolla generalmente entre los meses de junio a septiembre con mínimos en torno a los 20 mm/mes.

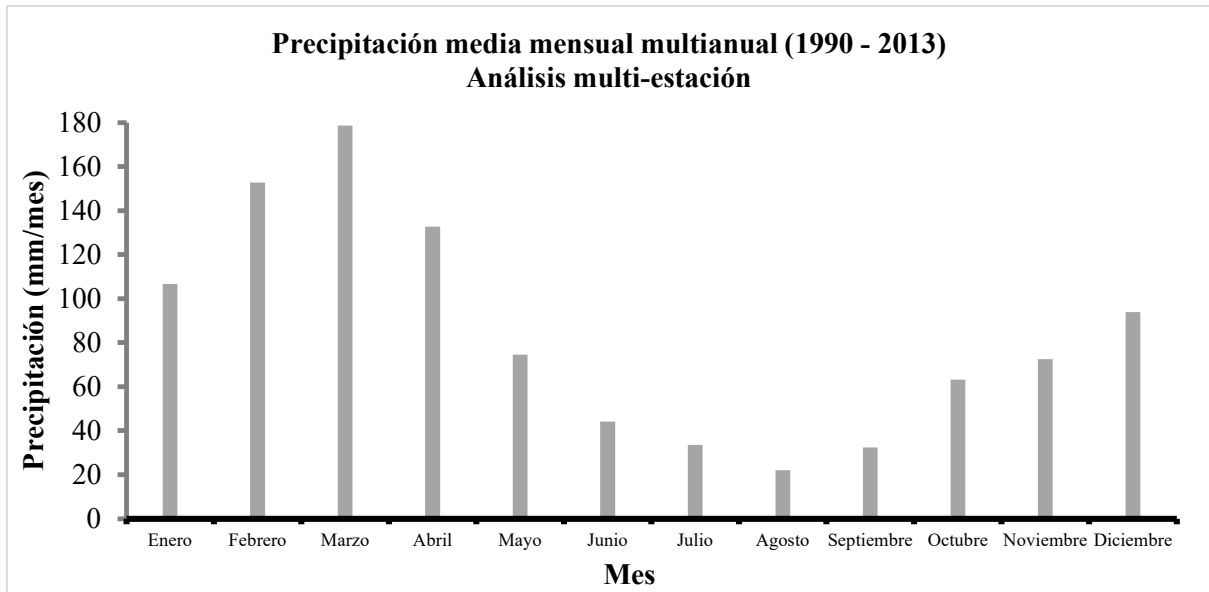


Figura 12. Precipitación media mensual multi-estación

En la Figura 13 se presentan los promedios mensuales multianuales en diferentes estaciones representativas para la zona de análisis. Las estaciones seleccionadas corresponden a El Pangui, Jimbura y Salique, las cuales están distribuidas en diferentes sectores para detallar la variación espacial en los regímenes meteorológicos. En el noreste de la zona de estudio se detalla un régimen más uniforme a lo largo del año característico de la zona Amazónica, en el cual no hay distinción marcada de temporadas. Por otro lado, en el límite sur entre Ecuador y Perú, y el norte de Perú asociados a un régimen de cordillera o sierra se observan dos estaciones muy marcadas, una seca que se desarrolla en la mitad del año mientras una lluviosa en los meses restantes.

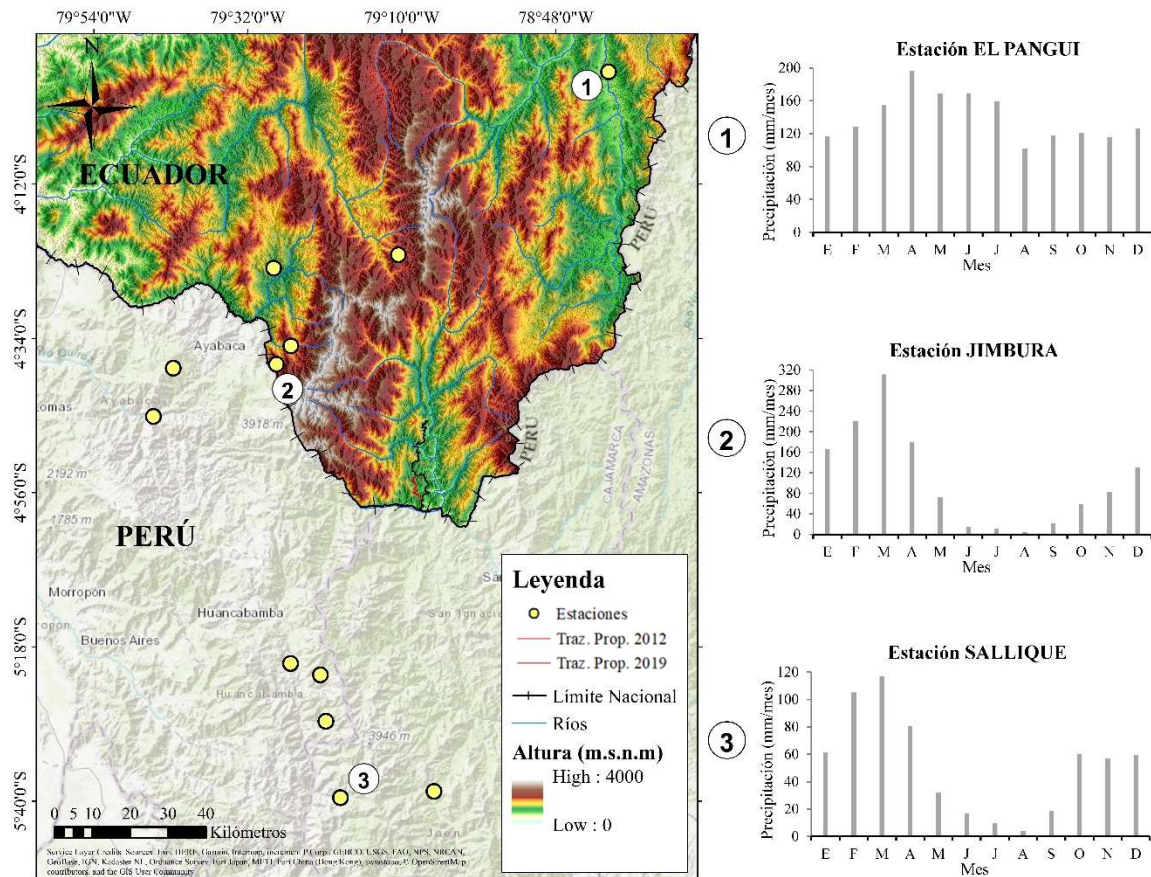


Figura 13. Precipitación media mensual multianual en estaciones representativas en la zona de estudio.
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 14 se presenta la precipitación media anual interpolada a lo largo del límite entre Ecuador y Perú en inmediaciones de la vía. Es importante recalcar la variación espacial de la lluvia. En torno al este las lluvias tienden a ser más fuertes por su cercanía al Amazonas oscilando entre los 1,500 y 2,000 mm/año. Al acercarse a la cordillera de los Andes las profundidades de precipitación decrecen hasta alcanzar el rango entre 800 y 1,000 mm/año. Una vez se cruza la cordillera se entra a la vertiente hidrográfica del Pacífico que por sus características particulares presenta un régimen lluvioso bastante seco con valores inferiores a los 500 mm/año. Con respecto al tramo de estudio la precipitación es muy constante en todo el recorrido con un valor medio de 1,300 mm/año.

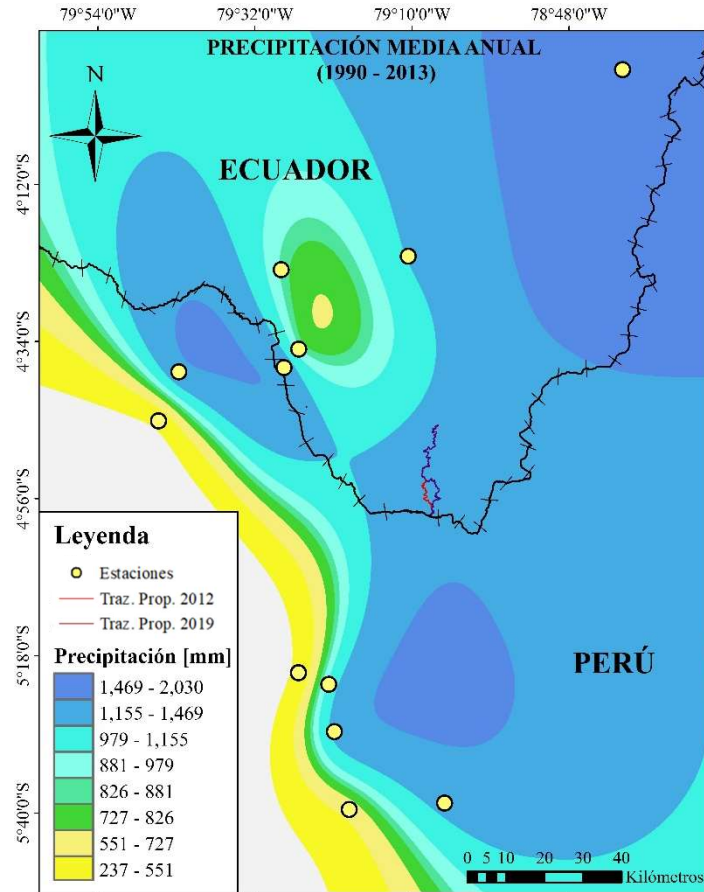


Figura 14. Precipitación media anual en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

3.4.3 Resultados máximos mensual anual

Con los datos mensuales de profundidad de lluvia completados y homogeneizados para el periodo entre 1990-2013 se procedió a realizar el análisis mensual de máximos anuales por estación. Se ajustaron distintas funciones de probabilidad con el método de máxima verosimilitud y se eligió la más adecuada mediante el criterio de Akaike Information– AIC (Mazerolle, 2004). Para todas las estaciones se obtuvo como resultado la función Weibull o distribución tipo III de valores extremos (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012). A partir de la parametrización previa se generaron los mapas de máximos anuales para diferentes periodos de retorno, con lo que se logró caracterizar el régimen mensual actual más crítico en la zona de estudio. En la Figura 15 se presentan los mapas para los periodos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. De estos mapas se puede concluir que, en términos de eventos extremos, la dinámica espacial es diferente al promedio, ya que mensualmente en

cercanías a la vía llueve más intensamente que en otras zonas, como por ejemplo la amazónica. Los valores oscilan entre los 220 mm/mes hasta los 580 mm/mes asociados al periodo de retorno de 2 y 100 años respectivamente.

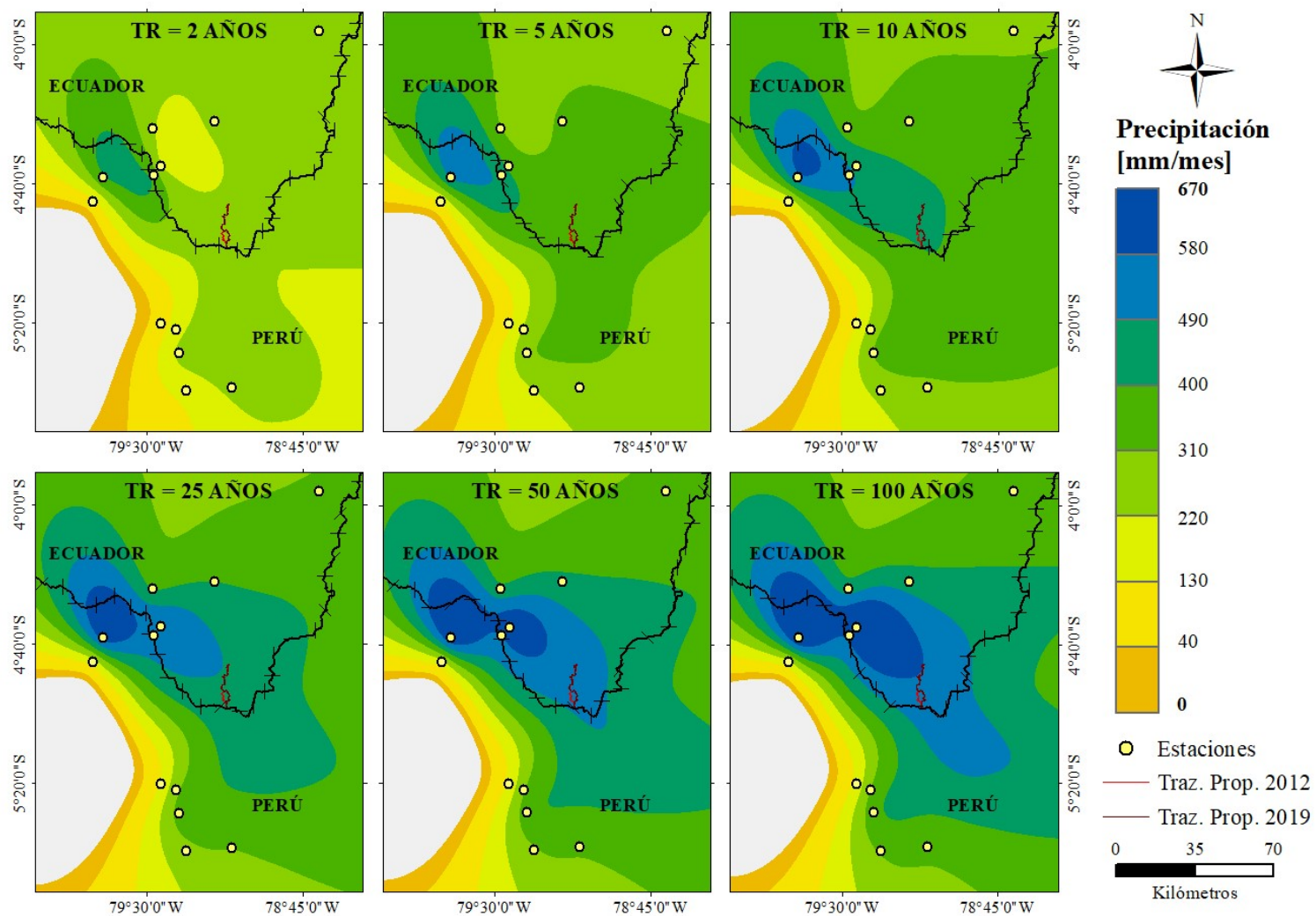


Figura 15. Mapas probabilistas de lluvia para diferentes periodos de retorno

3.4.4 Cambio climático

De acuerdo con los diferentes reportes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático – IPCC, “el Cambio climático es una alteración en el estado del clima, el cual puede ser identificado (i.e. a través de pruebas estadísticas) por modificaciones en los valores medios o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante un periodo extendido de tiempo, típicamente décadas o más. Se refiere a cualquier cambio en el clima a través del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana”.

Una de las aproximaciones al estudio de este fenómeno se basa en el uso y aplicación de los Modelos Climatológicos Globales o Modelos de Circulación Global (MCGs en adelante). Estos son algoritmos matemáticos que representan el sistema climático de la Tierra y permiten obtener una aproximación numérica en una región de análisis particular. Juegan un papel importante en la investigación del clima pues permiten mejorar la capacidad de entender el clima que se presentó en el pasado, sus cambios y las causas que pudieron estar detrás de estos cambios. Además, permiten obtener información cuantitativa del clima hacia el futuro. En los siguientes literales se expone de manera resumida la metodología que se empleó para incorporar los efectos del Cambio Climático y los resultados de su aplicación en el marco de este proyecto.

3.4.4.1 Metodología

Para obtener series de precipitación que consideren escenarios de Cambio Climático se emplea una metodología que consta en dos pasos principales: una validación de MCGs y una proyección de los resultados de los MCGs. El primer paso, aunque no siempre se lleva a cabo, es de vital importancia para robustecer el análisis. Es importante aclarar que la incorporación del Cambio Climático en los análisis presenta los siguientes supuestos y limitaciones:

1. El clima local está condicionado por la interacción entre las características atmosféricas a gran escala y los atributos locales como la topografía, uso del suelo, presencia de cuerpos de agua, entre otros. Esta relación es la base para la derivación de la información meteorológica a nivel local, en la cual se emplean resultados a gran escala y luego se reduce su resolución al adicionar las particularidades de la zona.
2. Para la reducción de escala de los MCGs a nivel local se emplea un modelo estadístico que permite obtener resultados a niveles menores de 50 km. Esta aproximación se fundamenta en la preservación de las relaciones entre las circulaciones climáticas a gran escala y el

clima local, aún bajo la influencia de los diferentes escenarios futuros. En consecuencia, las características de los patrones espaciales y temporales de lluvia del presente al futuro se mantendrán sin cambios notorios.

3. Todas las proyecciones climáticas están sujetas a diferentes fuentes de incertidumbre. Principalmente se consideran tres: la variabilidad interna del clima, la incertidumbre en los forzantes (causas del cambio climático) y la incertidumbre propia de los modelos. Los resultados que se presentan corresponden a valores tendenciales que tienen asociado un nivel de incertidumbre y que no los hace inválidos. Las proyecciones realizadas pueden ser empleadas para la toma de decisiones que se requieran.

3.4.4.2 Información base

La NASA (National Aeronautics and Space Administration) tiene una plataforma de acceso público llamada “Proyecciones Diarias Globales a Escala Reducida de Cambio de la Tierra de La NASA” (NEX-GDDP, por sus siglas en inglés), la cual permite generar proyecciones climáticas (temperatura máxima y mínima diaria y precipitaciones diarias para periodos entre 1950 hasta 2100) para cada uno de los 21 modelos del CMIP5 (ver Tabla 8) y a través de dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero conocidos como Caminos de Concentración Representativas (RCPs); un escenario pesimista (RCP 8.5) y uno optimista (RCP 4.5). Todos los modelos cuentan con una resolución espacial de 0.25° x 0.25° (grillas de 25 km x 25 km, aproximadamente).

Tabla 8. Modelos Climáticos Globales. Quinto Reporte IPCC. Fuente: (CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project , 2016)

MODELO	INSTITUCIÓN	PAÍS
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	Rusia
BCC-CSM1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
NorESM1-M	Norwegian Climate Center	Noruega
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute	Japón
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology	Alemania
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology	Alemania
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokio), National Institute for Environmental Studies, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japón
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokio), National Institute for Environmental Studies	Japón

MODELO	INSTITUCIÓN	PAÍS
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokio), National Institute for Environmental Studies	Japón
IPSL-CM5A-MR	Institute Pierre-Simon Laplace	Francia
IPSL-CM5A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace	Francia
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Princeton University)	Estados Unidos
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Princeton University)	Estados Unidos
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Princeton University)	Estados Unidos
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada
CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Queensland Climate Change Centre of Excellence	Australia
CNRM-CM5	National Centre for Meteorological Research	Francia
CESM1-BGC	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research	Estados Unidos
CCSM4	National Center for Atmospheric Research	Estados Unidos
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	China
ACCESS1-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Bureau of Meteorology	Australia

3.4.4.3 Validación de los modelos climáticos globales (MCGs)

Los MCGs al ser de carácter global tienen mejor precisión en algunos puntos del planeta que en otros, por lo que es necesario realizar una validación de resultados para determinar los modelos con mejor capacidad para representar las condiciones climáticas locales, en este caso los regímenes de precipitación, en el periodo histórico.

La validación de MCGs requiere de dos entradas principales: los datos históricos observados en la zona de estudio y los datos obtenidos para el mismo periodo de tiempo histórico obtenidos a través de un MCG a nivel diario. El periodo de análisis debe encontrarse en las fechas de análisis retrospectivas de los MCGs, entre 1950 y 2005, y debe ser mayor a 20 años para garantizar la robustez del análisis. La información histórica debe encontrarse completa y homogeneizada en su totalidad.

Una vez obtenidas las precipitaciones observadas de las estaciones y las modeladas a partir de los MCGs en los puntos de la malla donde se ubican dichas estaciones, se procede a realizar un análisis de correlación entre precipitaciones multianuales históricas observadas y modeladas, a partir de una asociación lineal entre éstas utilizando el coeficiente de correlación lineal de Pearson (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012) representado por la siguiente ecuación:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde x corresponde a la precipitación obtenida con cada MCG mientras que y es la serie de precipitación observada en cada estación meteorológica. Por su parte, n corresponde al número de datos disponibles para calcular el coeficiente. De esta manera se obtiene un coeficiente de correlación para cada par MCG y dato de estación.

A partir de estos resultados se promedia el desempeño de cada uno de los 21 MCGs disponibles en las estaciones disponibles y se elabora el ranking de estos coeficientes. Posteriormente, para escalas mensuales de análisis se selecciona aquel con el mayor coeficiente puesto que, en términos medios, sería el MCG que mejor se acopla a los datos locales.

3.4.4.4 Proyección de series de precipitación

El modelo seleccionado se utiliza para generar registros probables de precipitaciones futuras. Para esto se selecciona un periodo de análisis al futuro ya sea a mediano y/o largo plazo, de igual forma se debe elegir un escenario tendencial de emisiones (RCP 4.5 o 8.5) o ambos. Por otro lado, se define el periodo de control, que corresponde al rango de años sobre los cuales se calcula el factor de cambio para determinar la precipitación futura bajo el escenario de Cambio Climático. Dicho periodo de control corresponde a alguna ventana temporal de la precipitación histórica diaria obtenida de los registros de las estaciones seleccionadas. Este periodo será la base para comparar los resultados observados con los proyectados.

Las precipitaciones futuras generadas por los modelos no se utilizan de manera directa para analizar escenarios de cambio climático. En lugar de estos, dichos estimados se utilizan de manera indirecta para perturbar las precipitaciones históricas. Existen diversos métodos para generar precipitaciones proyectadas a partir de perturbaciones en precipitaciones históricas.

Para la presente metodología se utiliza el método “Delta Change”, el cual se enfoca en el cálculo de un factor de cambio entre la precipitación mensual histórica y la precipitación mensual proyectada en el periodo de control (Ruiter, 2012). El principal objetivo del método es encontrar un factor de conversión que transforme las lluvias acumuladas observadas en lluvias acumuladas proyectadas considerando el Cambio Climático. En términos generales se presenta como una

estrategia similar a utilizar directamente las proyecciones de precipitación obtenidas con MCGs, con la diferencia de que para aplicar el Delta Change no se requiere la corrección de los errores sistemáticos de los MCGs. Esto debido a que al ser una proyección que se aplica sobre los resultados de los modelos climatológicos en el presente, el error se está considerando en la misma proporción y por tanto puede ser anulado. Frente a otros métodos existentes para ajustar las escalas de los modelos, éste se presenta como una alternativa simple y computacionalmente económica.

Dentro de una aproximación clásica al método Delta Change, el cálculo de los factores de conversión se realiza solamente considerando cambios en los valores medios de las variables hidrológicas consideradas. Este factor de cambio se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{P_{MCG-futura}}{P_{MCG-histórica}} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde FC es el factor de cambio que se calcula con una frecuencia mensual, $P_{MCG-futura}$ y $P_{MCG-histórica}$ corresponden a la precipitación futura e histórica para el escenario tendencial y el MCG elegido.

Una vez calculado el factor de cambio es posible aplicarlo a la serie de precipitación de control observada y así convertirla en una serie de precipitación futura considerando el Cambio Climático. Para esto, todas las precipitaciones en un mes en particular para una ventana de tiempo histórico se multiplican por el factor de conversión calculado para dicho mes y en dicha estación.

3.4.4.5 Parámetros indicativos de la amenaza de lluvia

Para el caso de este estudio se consideraron los siguientes lineamientos para la incorporación del cambio climático:

- Como escenario tendencial de análisis se eligieron tanto el escenario optimista (RCP 4.5) como el pesimista (RCP 8.5), ya que se desea cuantificar los posibles cambios en la amenaza de lluvia para diferentes casos.
- Para efectos de validación de los MGCs se empleó el periodo de observación entre 1990 y 2005, a razón de la disponibilidad de los datos históricos de las estaciones.
- Como periodo de control se seleccionó el intervalo de tiempo entre 1990 y 2013. Mientras el periodo a proyectar correspondió al comprendido entre 2030 y 2053, el cual es un futuro

a mediano plazo y en el que se espera que opere la vía considerando una vida útil aproximada de 20 años.

Para efectos de automatizar los procedimientos y poder realizar comparaciones objetivas de los diferentes parámetros de amenaza se utilizan los siguientes paquetes de software (disponibles en www.ecapra.org):

- *IT-Cambio Climático-V1.0*
- *IT-Precipitación-V1.0*

Una vez se aplicó la metodología y para efectos de visualizar el eventual impacto del cambio climático en los diferentes parámetros que se utilizan normalmente en la caracterización y evaluación de la amenaza de lluvia, a continuación, se presentan las siguientes figuras y parámetros indicando en cada caso los resultados de la información histórica disponible (periodo 1990-2005) con los correspondientes a la información proyectada (periodo 2030-2053) incluyendo el cambio climático. Los resultados son los siguientes:

- Dispersión de los MCGs: para visualizar la necesidad de realizar la validación de los modelos en la Figura 16 se presentan los diagramas de cajas y bigotes (box-whisker) para 3 estaciones localizadas en diferentes puntos de la zona de estudio. Estos diagramas resumen la información sobre la distribución y dispersión de los datos de los MCGs. Para efectos comparativos se incluye el valor medio histórico observado y los percentiles 25 y 75 de los datos históricos. De los diagramas se puede concluir que hay una alta dispersión en los modelos por lo que los valores esperados pueden variar de manera importante en rangos de hasta 500 mm/mes. En el caso de la estación El Pangui, localizada en cercanías al Amazonas, los valores medios tienen concordancia con el valor medio del ensamblaje de los MCGs. No obstante, para el caso de las otras dos estaciones, ubicadas sobre la cordillera, los valores medios observados están siempre sobre el valor medio del ensamblaje por lo que no se recomienda su uso al subestimar los datos. Este último patrón se seguiría en inmediaciones de la vía por estar localizada igualmente en los Andes. Por otro lado, tampoco es pertinente usar los valores extremos ya que se podría sobrestimar los resultados de manera exagerada.

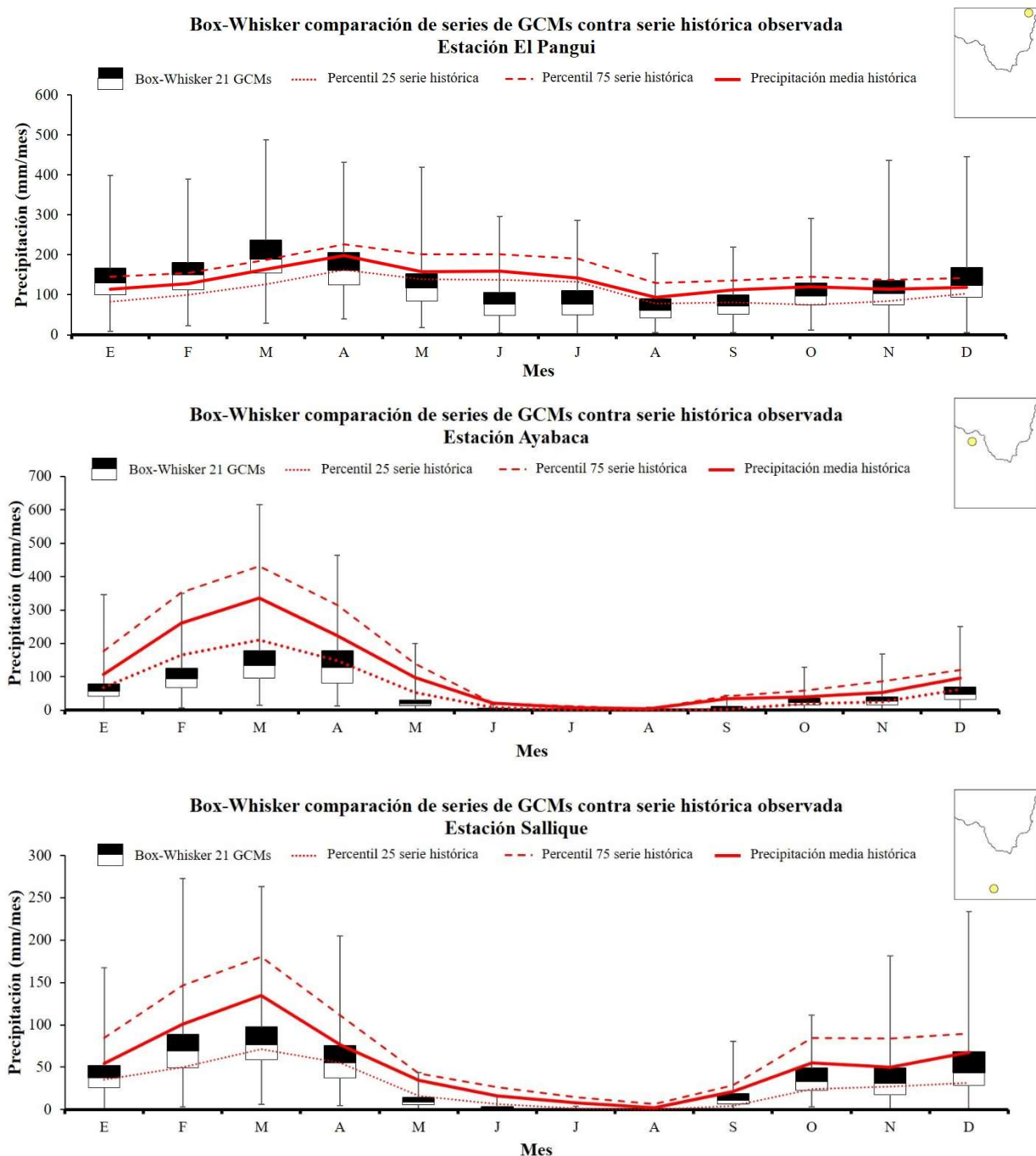


Figura 16. Diagrama de cajas y bigotes de valores medios mensuales de precipitación de los 21 MCGs y los observados

MCG que mejor se ajusta: corresponde al modelo con mejor capacidad para representar las condiciones pluviales de la zona de estudio luego de la realizar la validación. En este caso fue el **MIROC-ESM (Model for Interdisciplinary Research on Climate - Earth System Model)**, el

cual acopla modelos de atmósfera, océano y suelo-vegetación y es manejado por la Universidad de Tokyo, NIES (National Institute for Environmental Studies) y JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology). En la Figura 17 se presenta la correlación obtenida en cada uno de los MCG. Para más información consultar: (Watanabe, 2011).

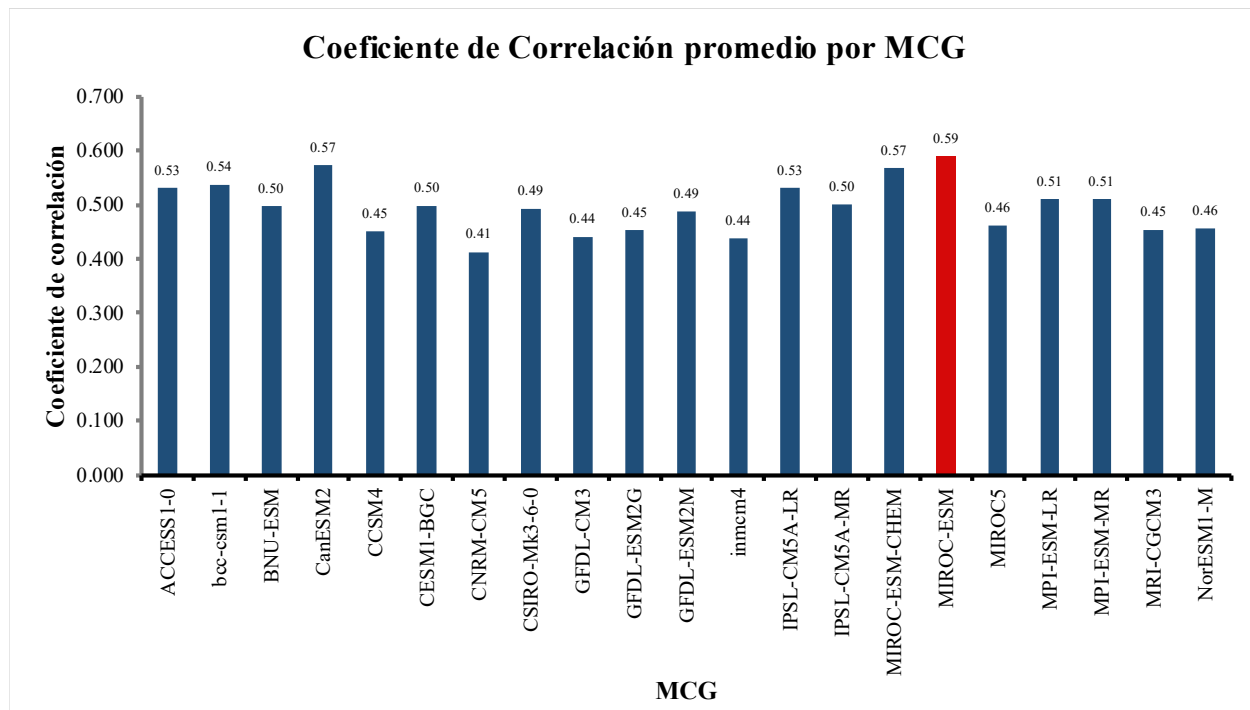


Figura 17. Coeficiente de correlación promedio por MCG

Precipitación media mensual multianual: corresponde a los valores de precipitación promedio mensual para el total de años. En la Figura 18 se presentan los resultados con y sin cambio climático para efectos comparativos, considerando los dos escenarios tendenciales. Es de notar la variación de los cambios a través del año. Se esperan aumentos en la precipitación en los meses de la época seca de máximo 40% mientras en la época húmeda hay reducciones de hasta el 30%. Sin embargo, en el mes más lluvioso, marzo, se espera un aumento en la profundidad de lluvias. Los valores para ambos escenarios mantienen una misma tendencia, pero con intensidades superiores para el RCP 8.5. Este comportamiento es el esperado, ya que hasta el 2050 el forzante radiativo en ambos casos aumentará paulatinamente, pero a diferentes tasas de aumento.

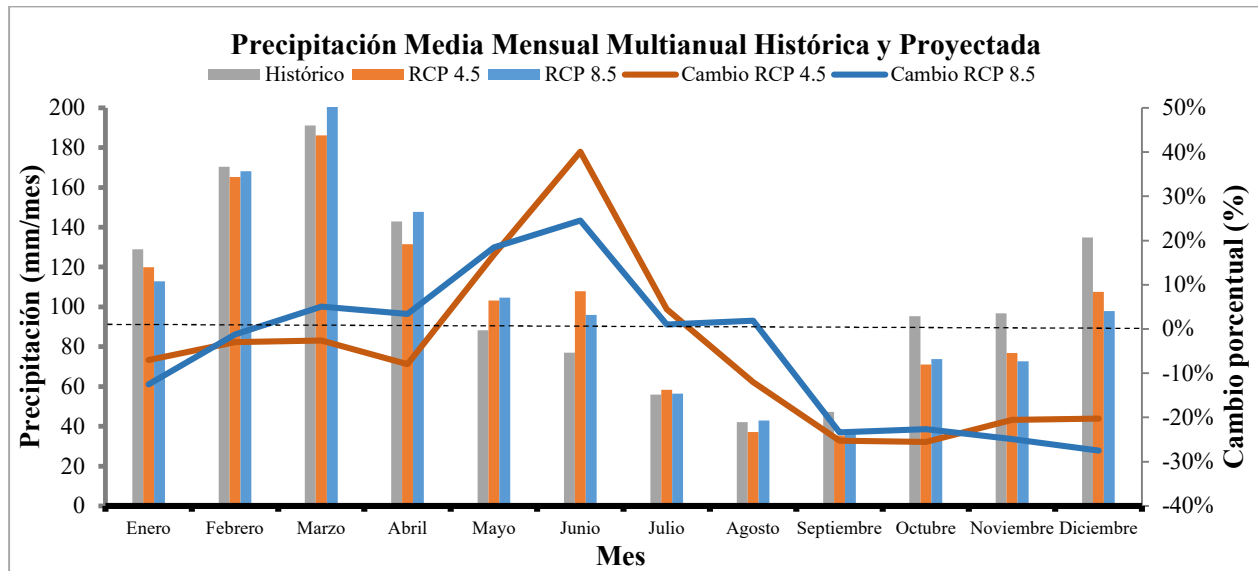


Figura 18. Precipitación media mensual multianual observada y proyectada (RCP 4.5 y 8.5)

Precipitación media anual: corresponde a la variación en los valores medios de profundidad anual. En la Figura 19 se presenta el mapa de la distribución espacial de la media de las lluvias. Se presentan los valores esperados para ambos escenarios y para efectos comparativos se presenta el cambio en términos porcentuales con respecto al periodo observado. Se puede concluir que para ambos futuros tendenciales se espera una reducción generalizada de la profundidad de precipitación en el rango de 0 a 7%. En el caso pesimista las reducciones serán mayores en aproximadamente un 2%. En el sur, en el límite con Perú y en donde se localiza la vía, las disminuciones se encuentran en torno al 4% para el caso optimista y 6% para el pesimista. Es necesario recalcar que estas son variaciones anuales y por tanto en términos mensuales las tendencias podrían variar como se observa en la Figura 18.

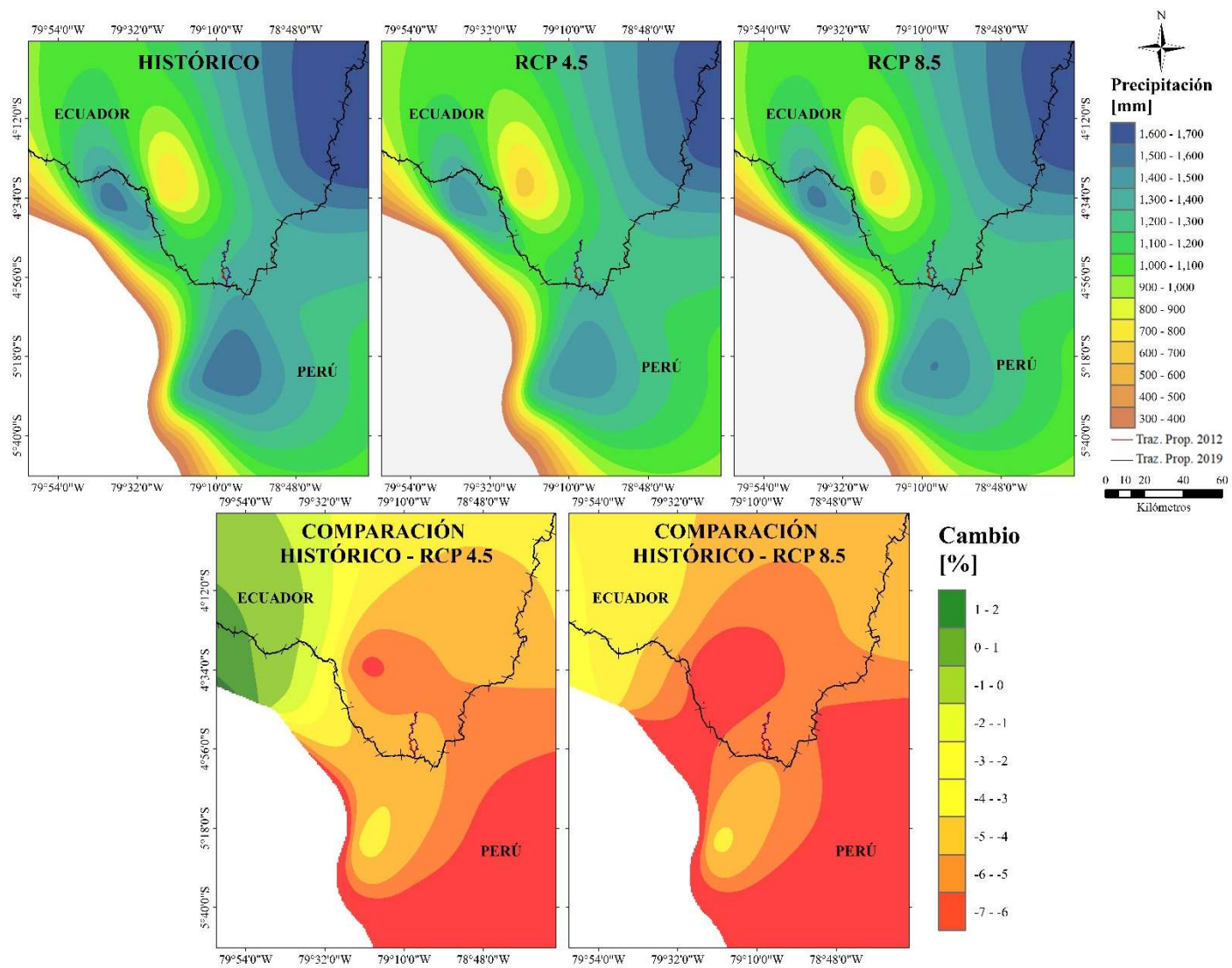


Figura 19. Precipitación media anual con cambio climático y comparación con periodo observado

3.4.4.6 Resultados de amenaza por lluvia

A partir de los resultados anteriores, es posible obtener los factores de cambio debido al Cambio Climático. Estos factores se aplican directamente a la serie de lluvias históricas a nivel mensual para realizar la evaluación de amenaza presentada en el capítulo anterior.

En la Figura 20 y Figura 21 se presentan los mapas probabilistas de lluvia para los periodos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años y para el escenario RCP 4.5 y 8.5 respectivamente. En la Figura 22 y Figura 23 se presentan los cambios porcentuales de la profundidad de lluvia para el escenario RCP 4.5 y 8.5 respectivamente.

Se determina que las variaciones de intensidad en los máximos mensuales son diferentes a las variaciones en los valores anuales promedio. Se observan aumentos mayores en los valores máximos de precipitación mensual a diferencia de las variaciones identificadas anteriormente en los valores anuales promedio. En este caso se evidencian aumentos en cercanías a la vía en el orden del 2 al 10% para ambos escenarios, siendo mayor pero no de manera notoria el caso RCP 8.5 por ser un futuro a mediano plazo. Los valores de amenaza oscilan entre los 300 a los 670 mm/mes. Los aumentos son más considerables en los periodos de retorno altos.

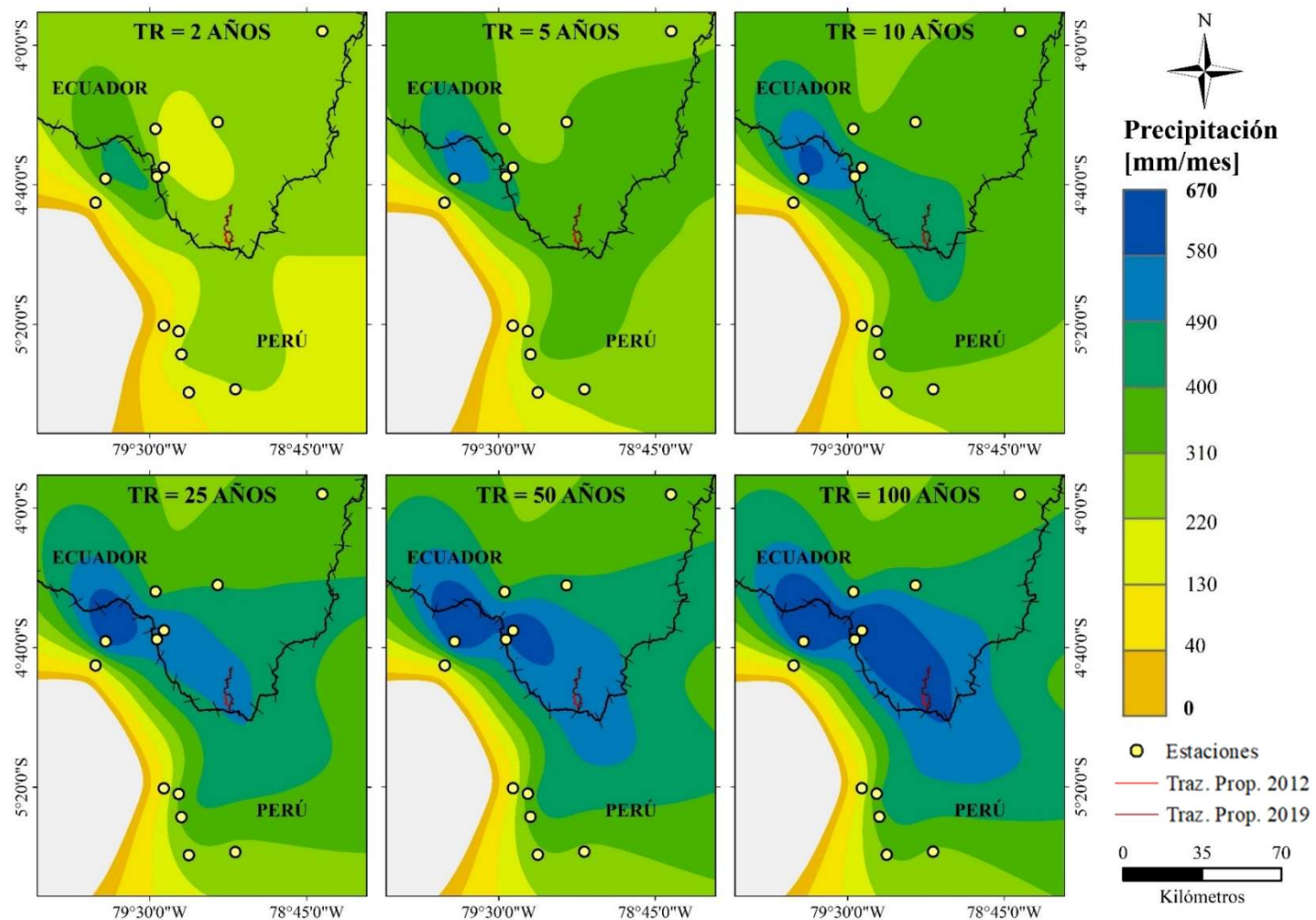


Figura 20. Mapas probabilistas de lluvia considerando el cambio climático para el escenario RCP 4.5

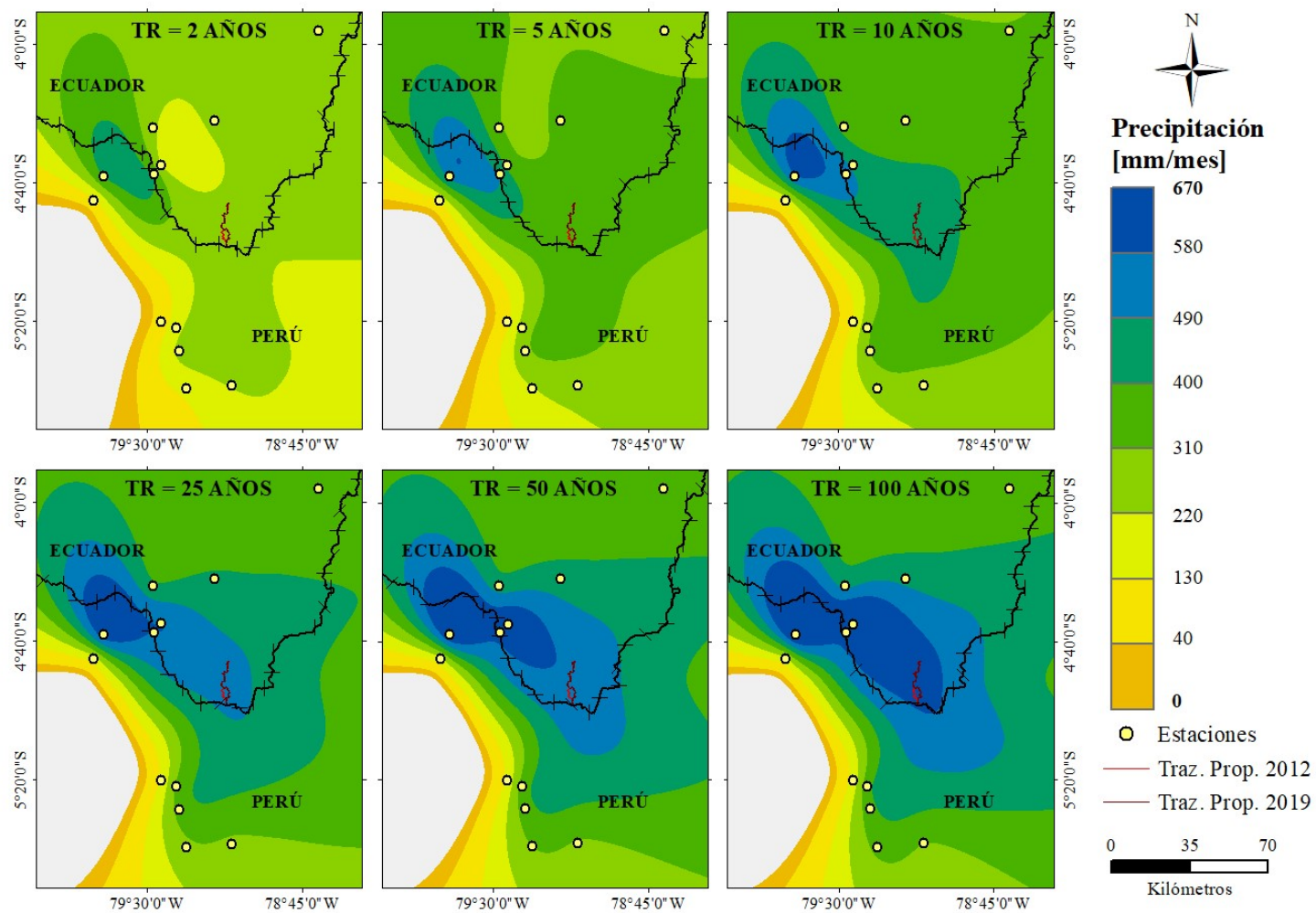


Figura 21. Mapas probabilistas de lluvia considerando el cambio climático para el escenario RCP 8.5

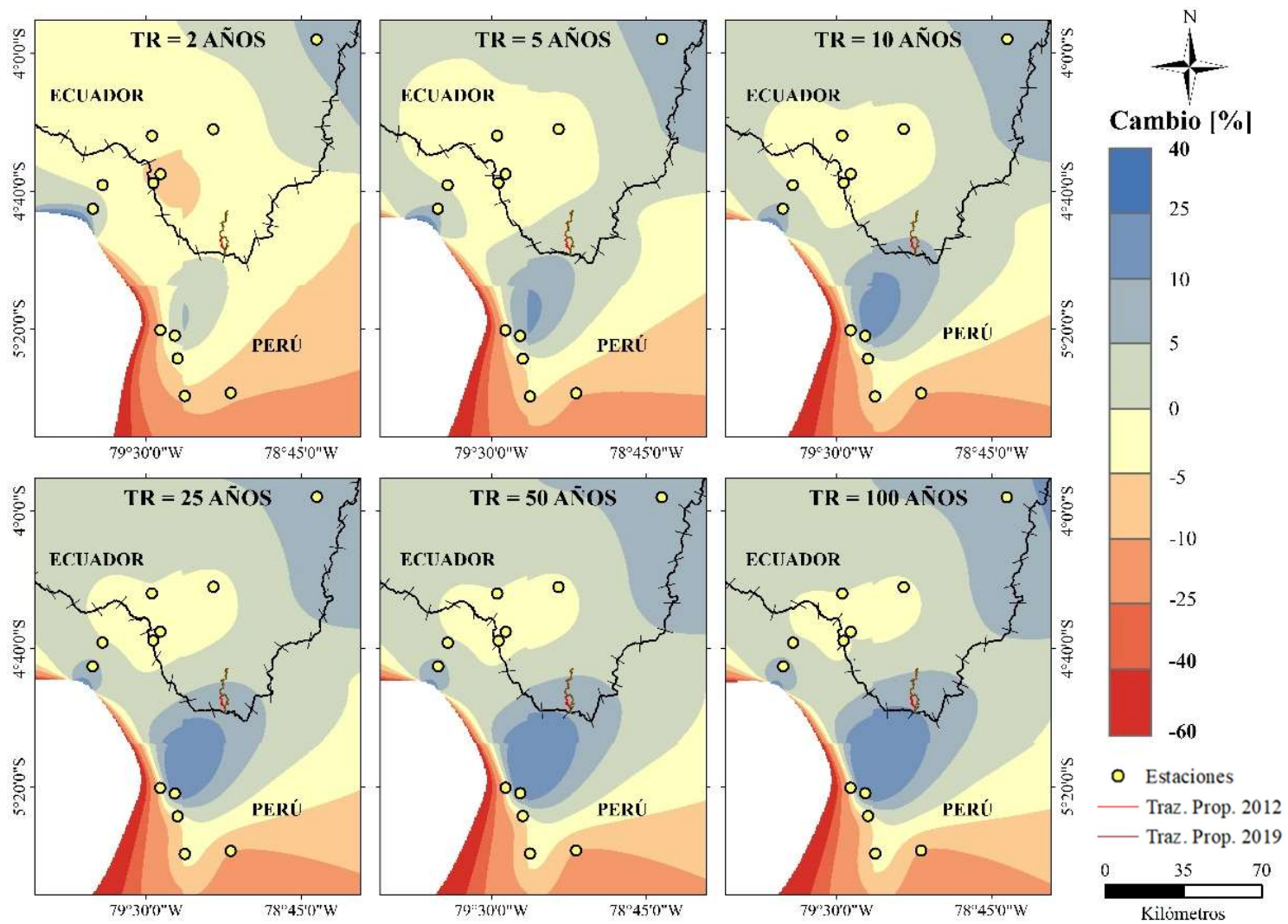


Figura 22. Diferencia porcentual en la amenaza de lluvia escenario RCP4.5

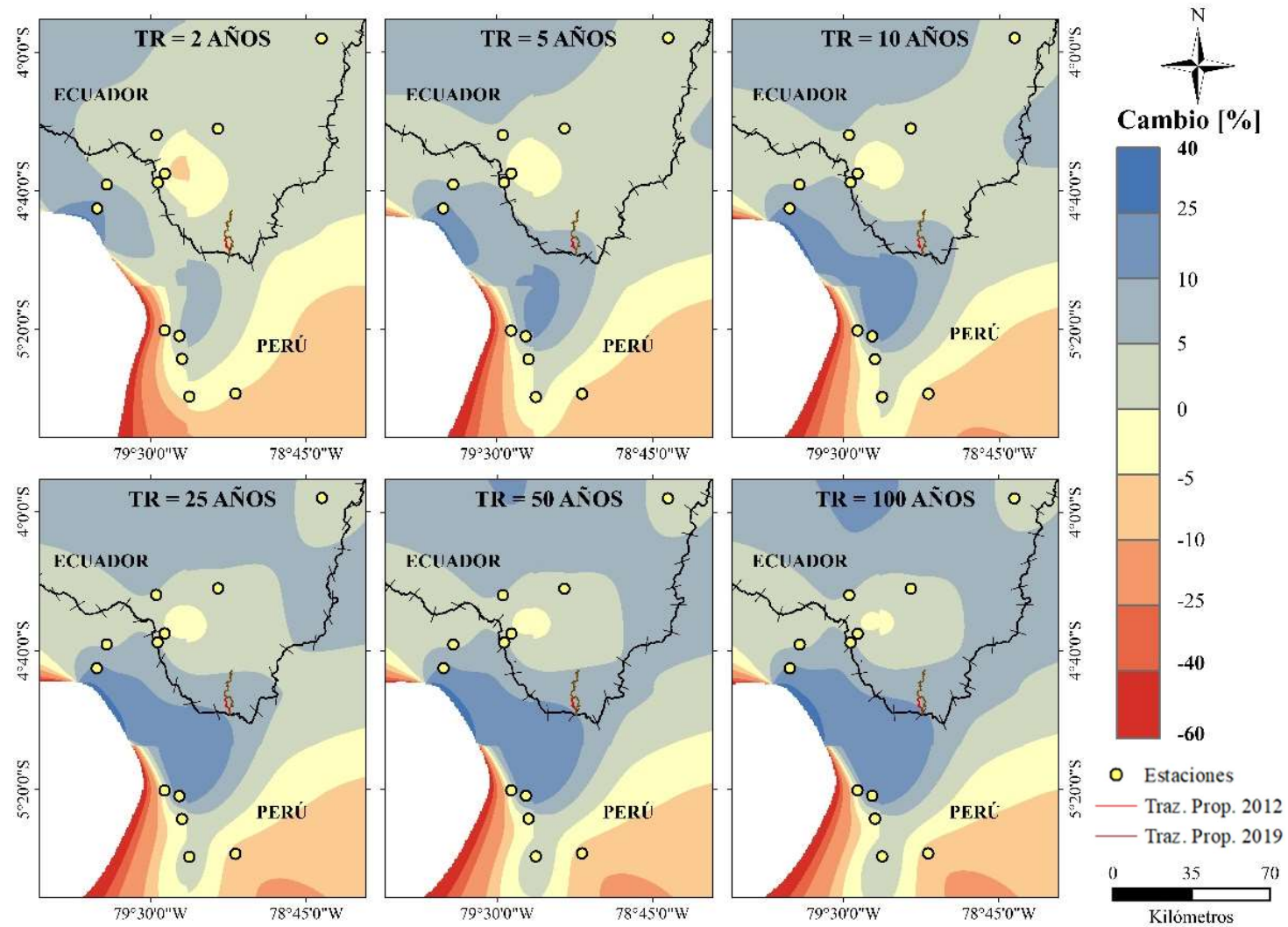


Figura 23. Diferencia porcentual en la amenaza de lluvia escenario RCP8.5 – Periodo observado

3.4.5 Modelo de amenaza estocástico

Para definir el catálogo de simulaciones de precipitaciones se utiliza la información de mediciones meteorológicas en las diferentes estaciones de Ecuador y Perú como se indicó en el numeral 3.4.2. Estos datos se interpolan para la zona de influencia del proyecto para cada uno de los meses en todos los años históricos, mediante el método *Spline de tensión* (Schweikert, 1986). Estos datos son analizados estadísticamente con el objetivo de verificar la existencia y magnitud de una autocorrelación y el ajuste de funciones de distribución de probabilidad (CDF) de cada mes del año. En la Figura 24 se pueden observar las distribuciones identificadas para cada uno de los meses del año.

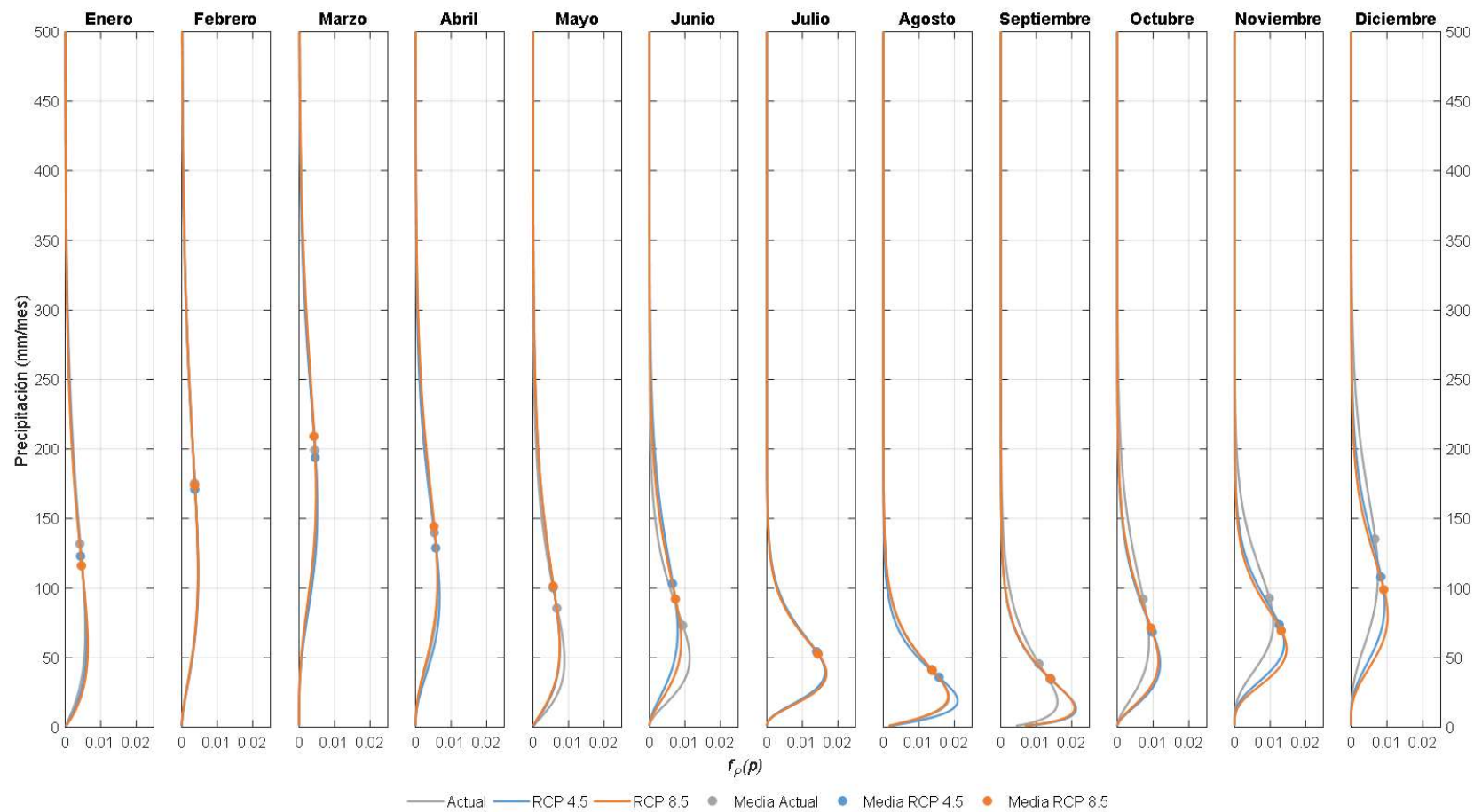


Figura 24. Distribuciones de probabilidad de precipitaciones para los 12 meses del año

A partir de la autocorrelación y las CDF se generan 1000 simulaciones anuales con el fin de obtener diferentes combinaciones de precipitaciones máximas, medias y mínimas. Con este modelo estocástico de lluvias con información mensual multianual, es posible entonces estimar de manera aproximada el impacto físico y económico en cada uno de los sitios críticos identificados con miras a la evaluación del riesgo en términos de costos directos de mantenimiento (por remoción de escombros y rehabilitación después de cada evento) y de costos indirectos por interrupción del tráfico por el tiempo que se requiere para reabrir la operación de la vía en cada evento. Este procedimiento se realiza también afectando los datos históricos por los factores de cambio climático para los dos escenarios tendenciales, es decir se generan 3 series diferentes de 1000 años, cada una asociada a un régimen hidrológico diferente. El resumen de esta metodología se presenta en la Figura 25. La metodología genera un catálogo mutuamente excluyente y colectivamente exhaustivo con escenarios de lluvia mensual multianual (1000 años) equiprobables. Los resultados obtenidos en cada uno de los catálogos se presentan en la Figura 26 en donde también se indican los valores medios en cada mes de las mil simulaciones correspondientes.

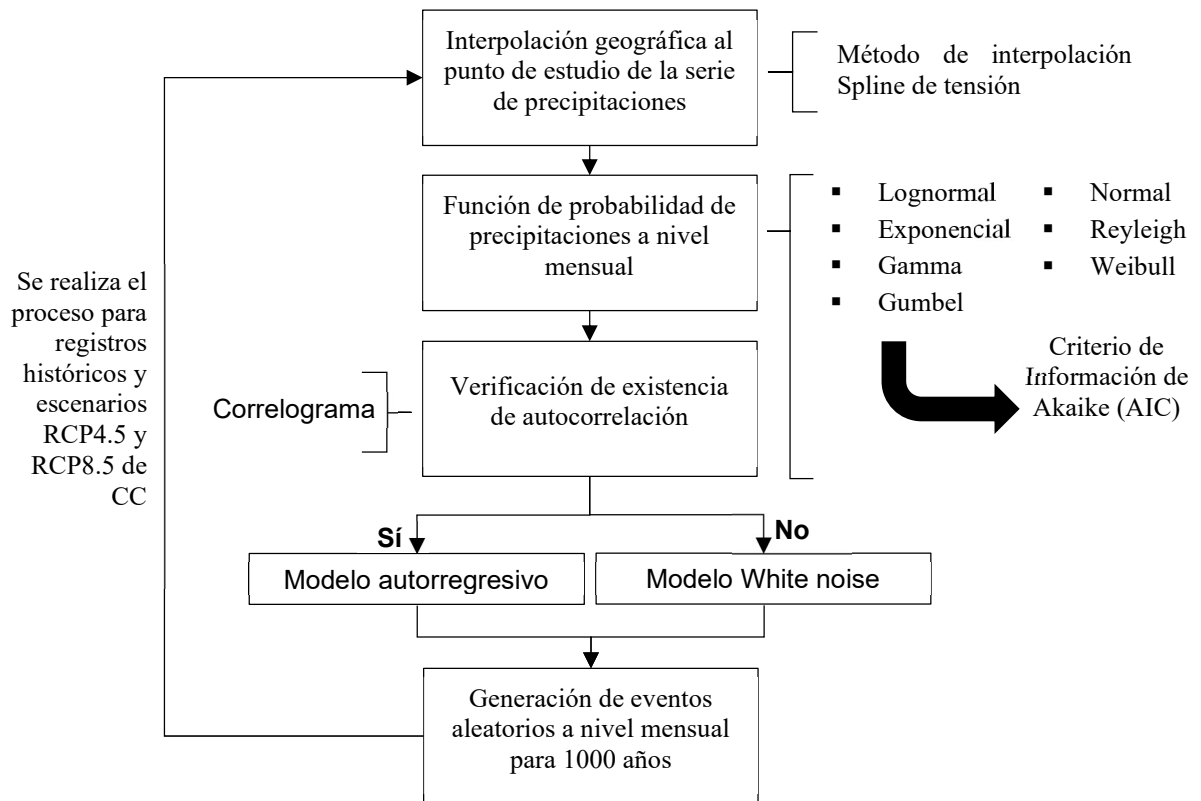


Figura 25. Metodología de generación de catálogo de eventos de precipitaciones

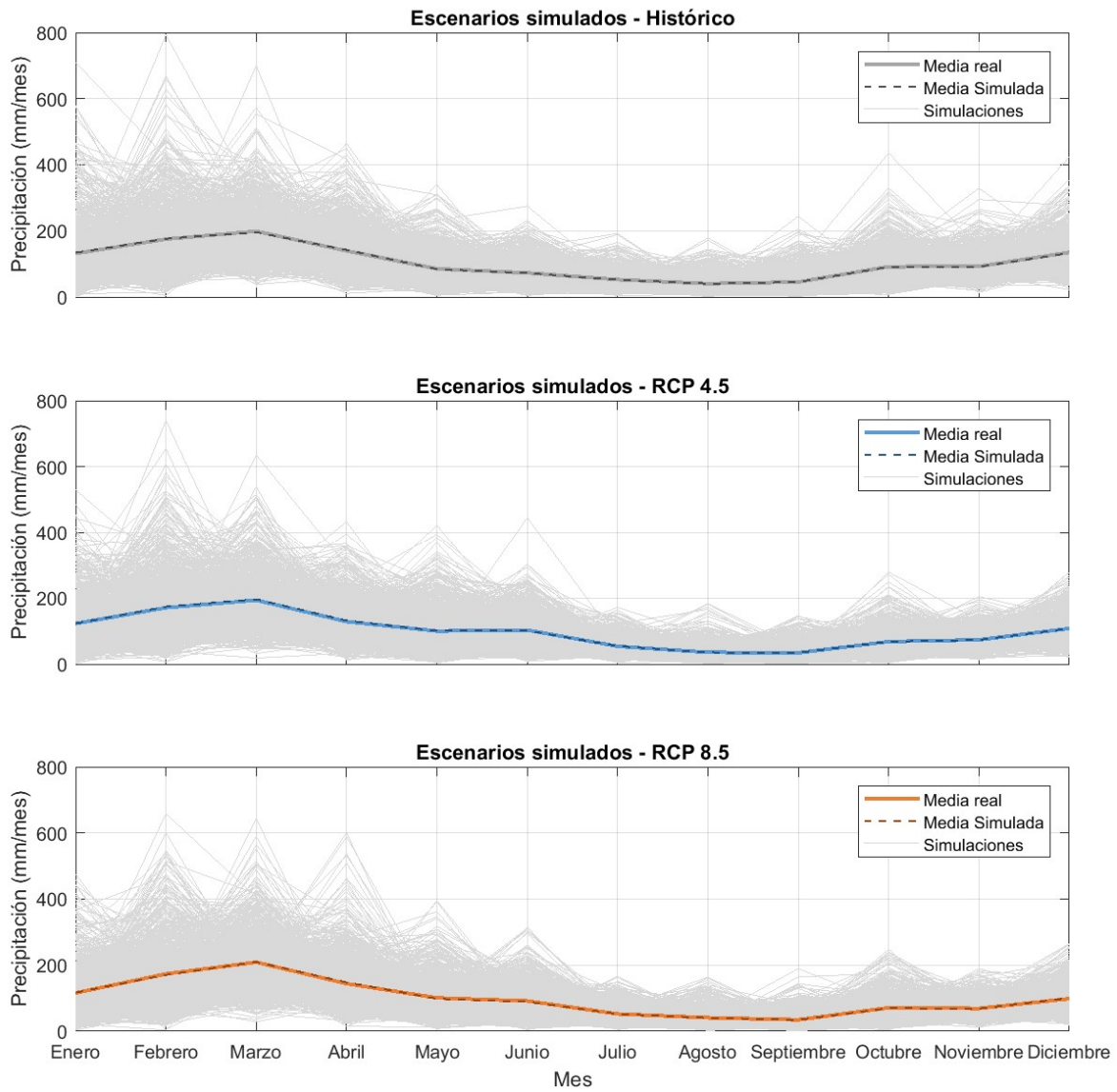


Figura 26. Catálogos de eventos de precipitación a nivel mensual

3.5 AMENAZA SÍSMICA

3.5.1 Metodología

Los eventos sísmicos seleccionados para el análisis fueron obtenidos a partir del modelo de amenaza sísmica desarrollado (BID-ITEC, 2021). La metodología utilizada para este análisis se resume en la Figura 27.

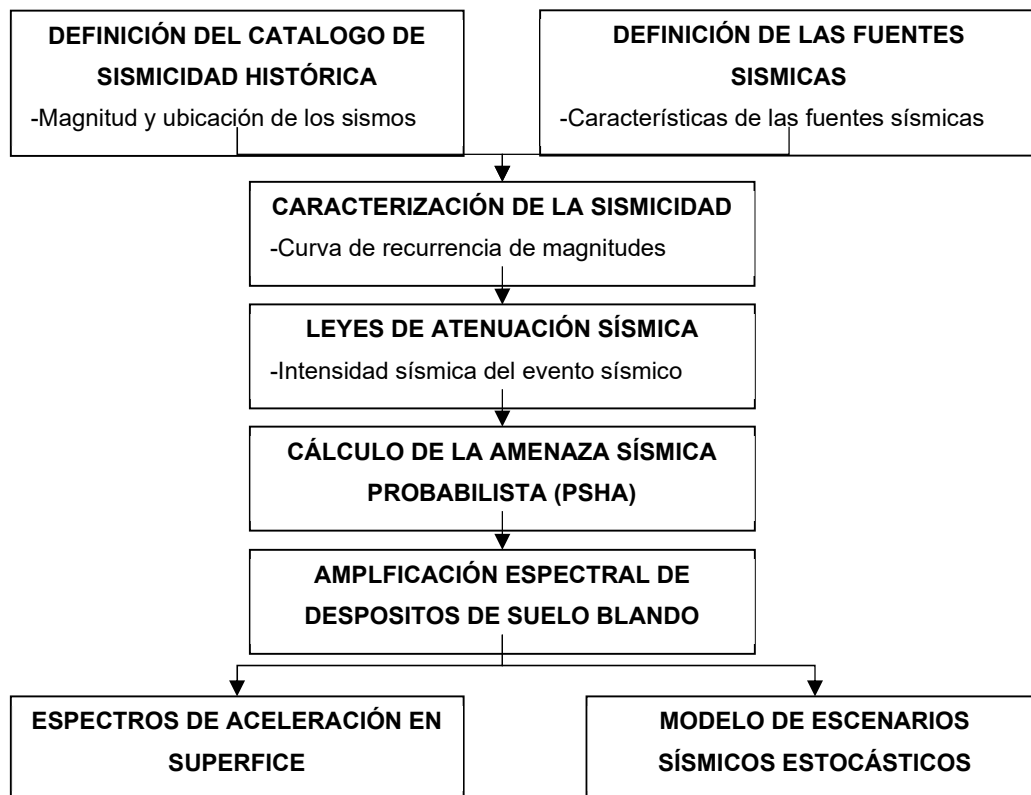


Figura 27. Metodología modelo de amenaza sísmica probabilista (BID-ITEC, 2021)

En la Figura 28 se presenta, de manera ilustrativa, el mapa probabilista de aceleración en superficie para 500 años de periodo de retorno. Para más información acerca del modelo consultar el informe BID-ITEC (2021).

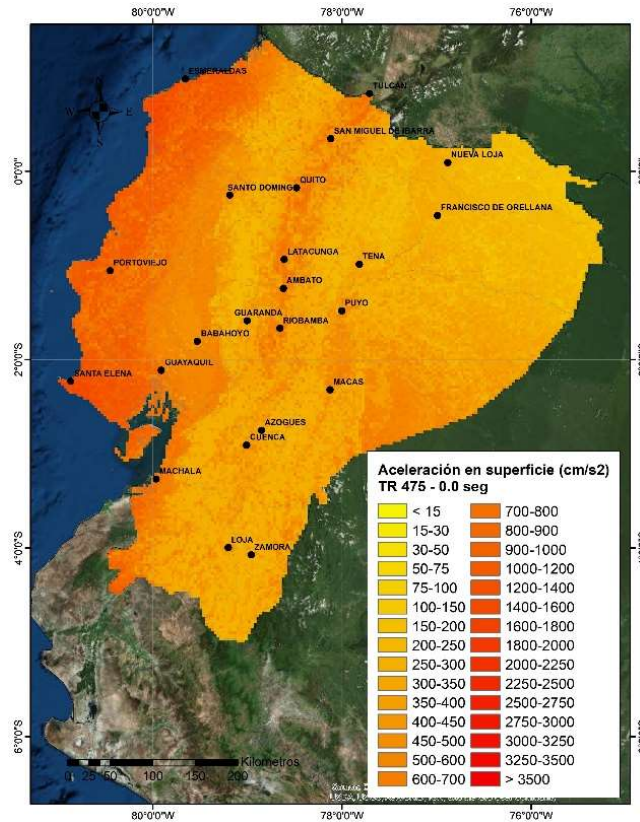


Figura 28. Distribución de la aceleración espectral en superficie (cm/s²) para un periodo de retorno de 500 años. Fuente: (BID-ITEC, 2021)

3.5.2 Escenarios estocásticos para el análisis

El modelo de amenaza sísmica desarrollado y que se explicó brevemente arriba, permite representar la amenaza sísmica en el país o en una zona en particular mediante un conjunto de escenarios estocásticos. Para el presente caso y con el fin de ilustrar las condiciones de riesgo en caso de presentarse un evento sísmico de alta magnitud, se han seleccionado dos escenarios representativos y relevantes para la zona de estudio.

Para la selección de los eventos más representativos se llevó a cabo la desagregación sísmica, la cual consiste en evaluar la probabilidad de ocurrencia de eventos con diferentes magnitudes a diferentes distancias de la zona del proyecto. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 29.

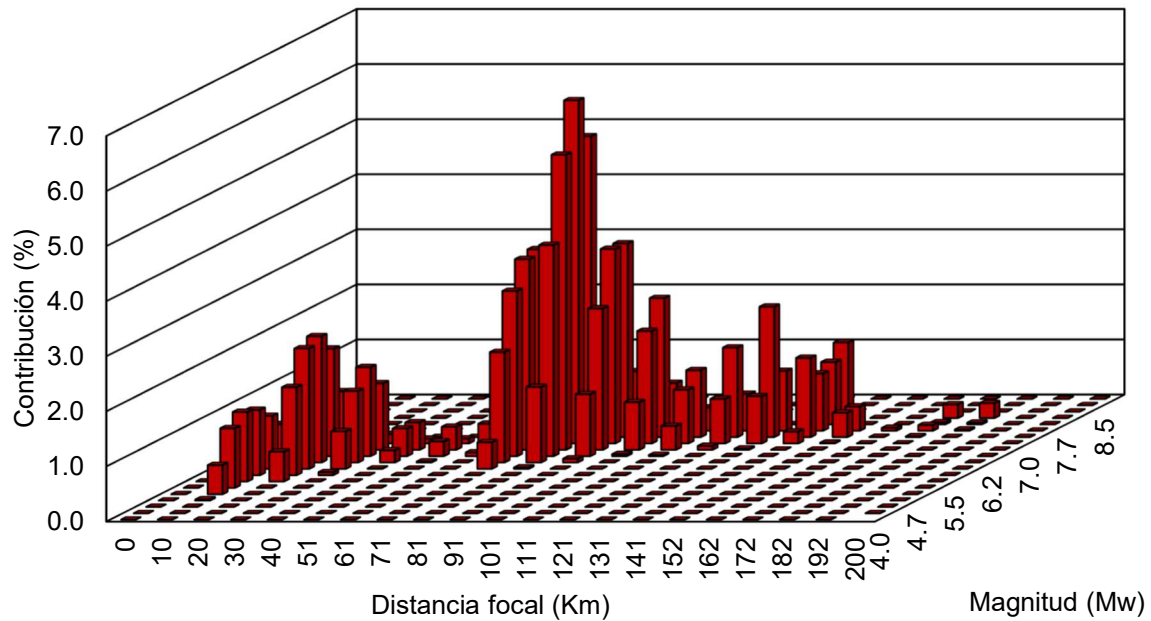


Figura 29. Desagregación sísmica para la zona de estudio

La curva de desagregación sísmica indica que la sismicidad dominante en la zona de estudio puede representarse por dos tipos de eventos principalmente: eventos con magnitudes en el orden de 7.0 Mw que ocurran en la zona de Subducción y que pueden estar localizados a una distancia promedio en el orden de los 70 a 80m km; y eventos con magnitudes en el orden de 6.0 Mw que podrían estar ocurriendo en fuentes de tipo cortical a distancias en el orden de los 20 a 30 km de la zona de estudio. De acuerdo con estos resultados y con el fin de ilustrar el efecto que sobre el riesgo puede tener la ocurrencia de un evento sísmico se seleccionan los escenarios indicados en la Figura 30 para llevar a cabo un análisis de tipo indicativo.

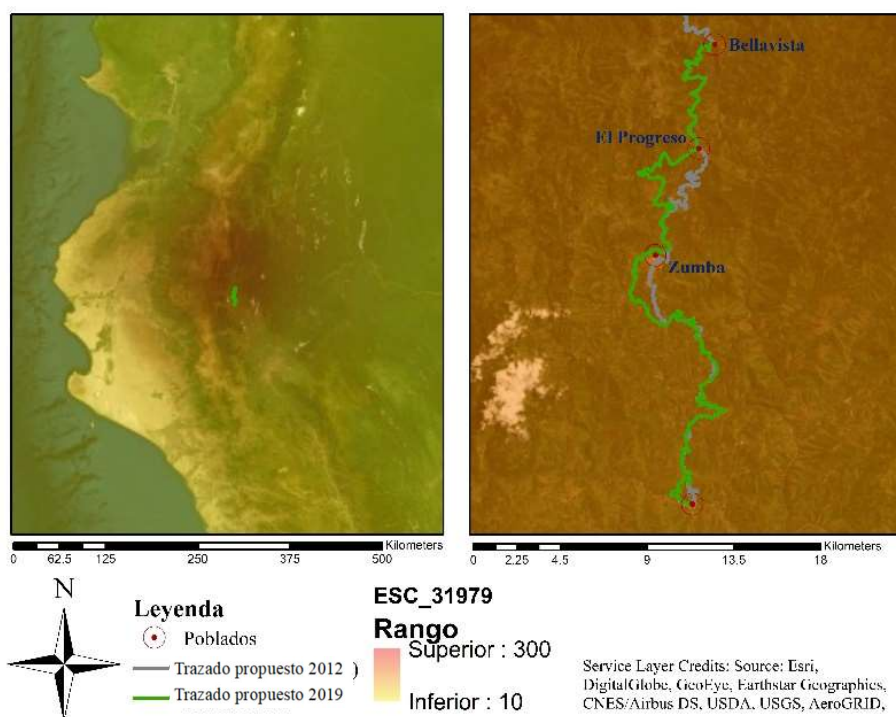
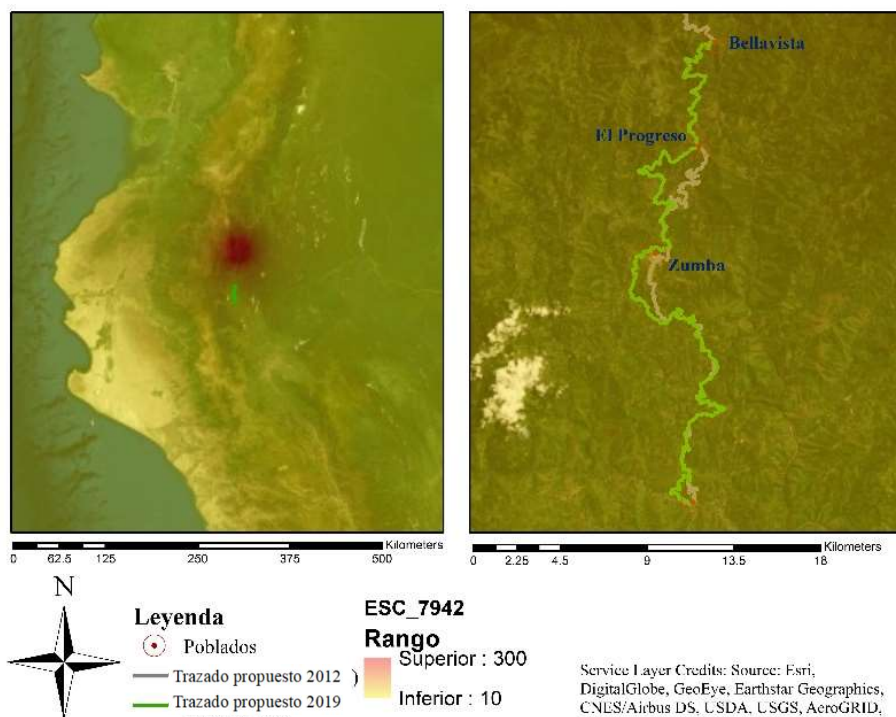


Figura 30. Escenarios sísmicos seleccionados para el análisis. Fuente: elaboración propia basada en resultados del perfil de riesgo nacional (BID-ITEC, 2021)

3.6 SUSCEPTIBILIDAD A INESTABILIDAD Y DESLIZAMIENTOS

Como se indicó en la metodología, los factores detonantes para la inestabilidad del terreno y la ocurrencia de deslizamientos son las precipitaciones acumuladas y las aceleraciones en el terreno por movimientos sísmicos. En este numeral se presenta la metodología utilizada para determinar esta susceptibilidad. Se utiliza para el efecto la evaluación simplificada del Factor de Seguridad (FS) al deslizamiento para un talud infinito, en la cual se identifican los deslizamientos cuyo tipo de falla es planar. Este método se selecciona debido a que permite integrar de forma simplificada espacialmente el efecto del aumento en la precipitación y las aceleraciones en el terreno, para de esta forma entender el aumento en la susceptibilidad debido a estos factores e identificar zonas críticas (Hidalgo & Vega, 2014). Vale la pena aclarar que, por las limitaciones propias del método, estos resultados se incluyen de manera indicativa, pero no son utilizados como base para la evaluación del riesgo que se presenta en el capítulo cuatro, la cual está basada en los puntos críticos identificados en el capítulo 3.3. La ecuación para determinar el FS es la siguiente:

$$FS = \frac{\frac{c'}{\gamma_{sat} * z * \cos^2 \beta} + \tan \phi' \left(1 - \frac{\gamma_w * hw}{\gamma_{sat}}\right) - A_a * \tan \phi' * \tan \beta}{A_a + \tan \beta}$$

En donde FS es el factor de seguridad al deslizamiento, c' la cohesión efectiva del suelo, ϕ' el ángulo interno de fricción efectivo del suelo, γ_{sat} el peso saturado unitario del suelo, z la profundidad del estrato deslizable (los parámetros geológicos anteriores se asignan a cada zona, a partir de los parámetros identificados en la sección 3.3.1 y 3.3.2), hw la Intensidad MDR (asignada para diferentes periodos de retorno a partir de los resultados de la evaluación mensual de precipitaciones presentados en el capítulo 3.4.3), γ_w el peso unitario del agua, 9.81 kN/m³, A_a la aceleración del terreno (asignada para diferentes escenarios según lo indicado en el capítulo 3.5.2) y β la pendiente del terreno (a partir del modelo de elevación digital). En la Figura 31 se muestra la representación esquemática de la metodología utilizada.

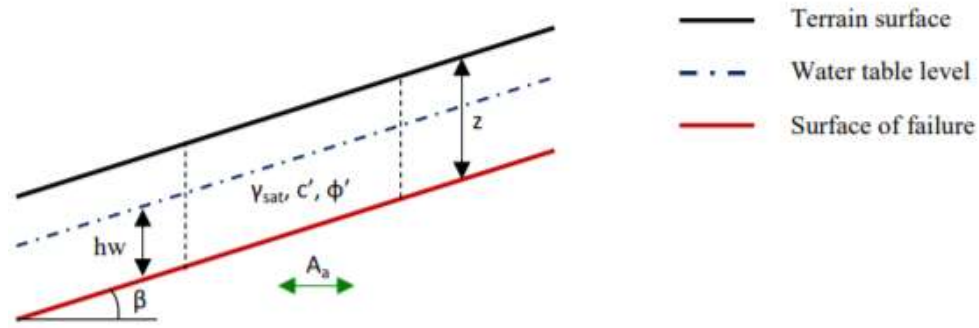


Figura 31. Esquema de determinación FS (Hurtado & Yamin, 2018)

3.6.1 Resultados para el escenario base

Para el escenario base se calculan los Factores de Seguridad (FS) en los dos trazados sin condiciones de precipitación ni eventos sísmicos. Este escenario representa las condiciones de temporadas secas en las cuales no se esperan zonas de inestabilidad críticas en la vía. Los resultados para los dos trazados se presentan en la Figura 32.

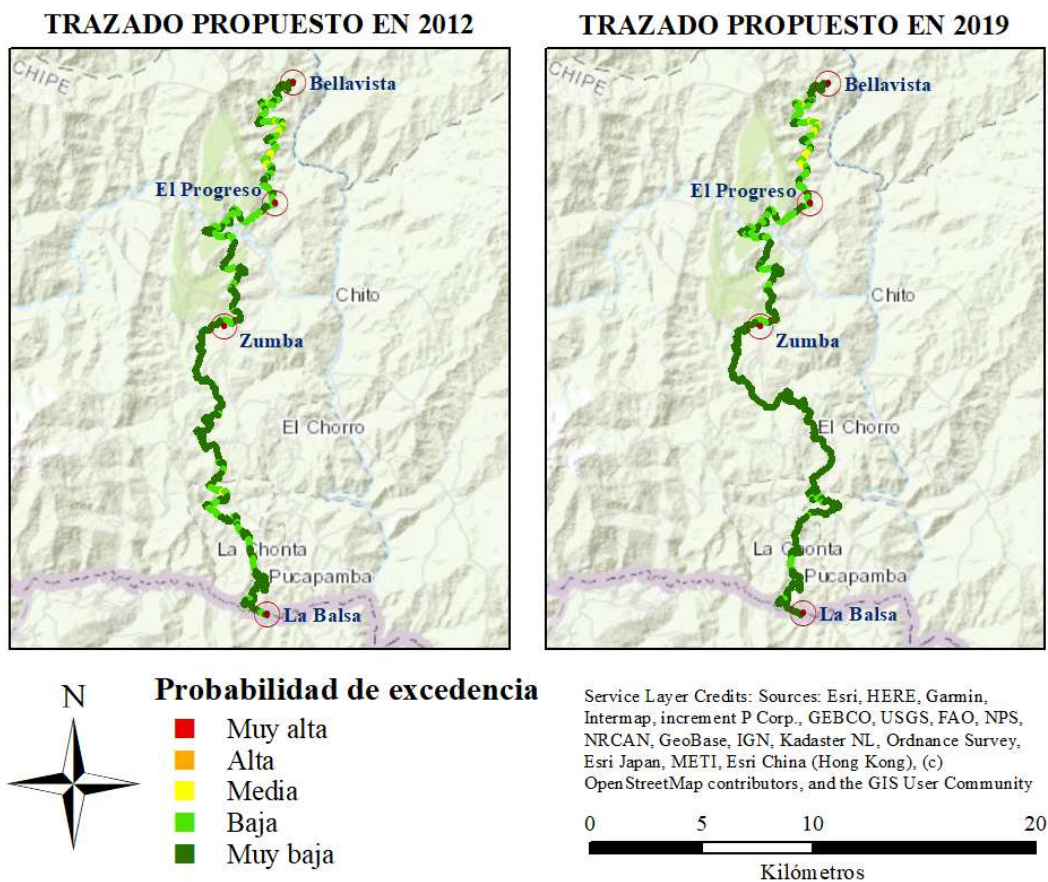


Figura 32. Susceptibilidad a deslizamientos escenario base. Fuente: elaboración propia

A partir de este modelo se realizan variaciones de las condiciones de precipitaciones y eventos sísmicos (ver sección 3.5). Como se indicó anteriormente, las precipitaciones se analizaron teniendo en cuenta las lluvias históricas y dos escenarios tendenciales de Cambio Climático. Cada una de estas condiciones está representada por 6 periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años). Las posibles combinaciones de amenazas naturales detonantes de procesos de inestabilidad del terreno y deslizamiento se presentan en la Figura 33.

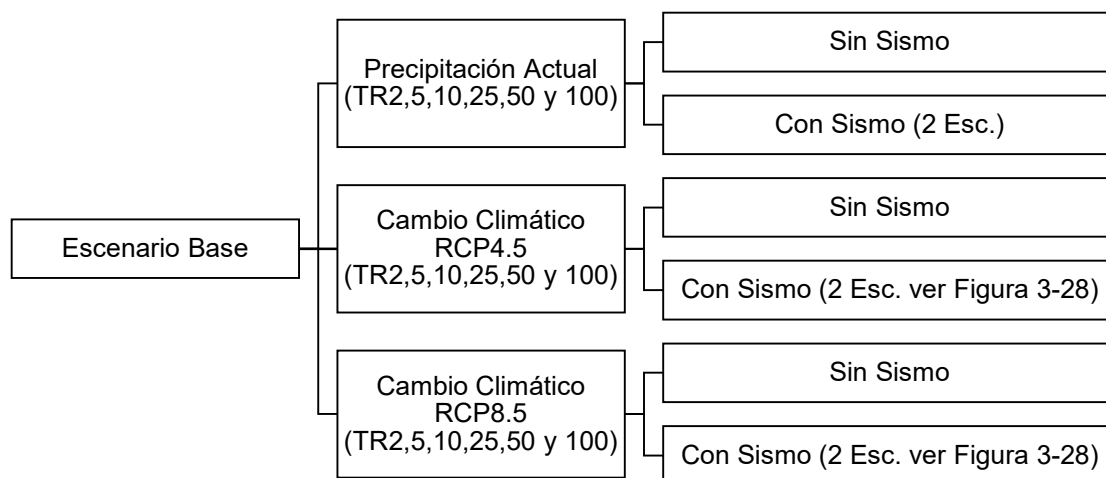


Figura 33. Posibles combinaciones de amenazas

Para este proyecto se analizan 5 casos de diferentes condiciones de amenazas. Estos casos y su descripción se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Casos de susceptibilidad de inestabilidad analizados

Caso	Precipitaciones	Eventos Sísmicos
Caso 1	No se considera	No se considera
Caso 2	Precipitación media histórica varios Tr	No se considera
Caso 3	Cambio climático RCP4.5 varios Tr	No se considera
Caso 4	Cambio climático RCP8.5 varios Tr	No se considera
Caso 5	Precipitación media histórica varios Tr	Escenario 1 (ver Figura 3-28)
Caso 6	Precipitación media histórica varios Tr	Escenario 2 (ver Figura 3-28)

3.6.2 Resultados Caso 2

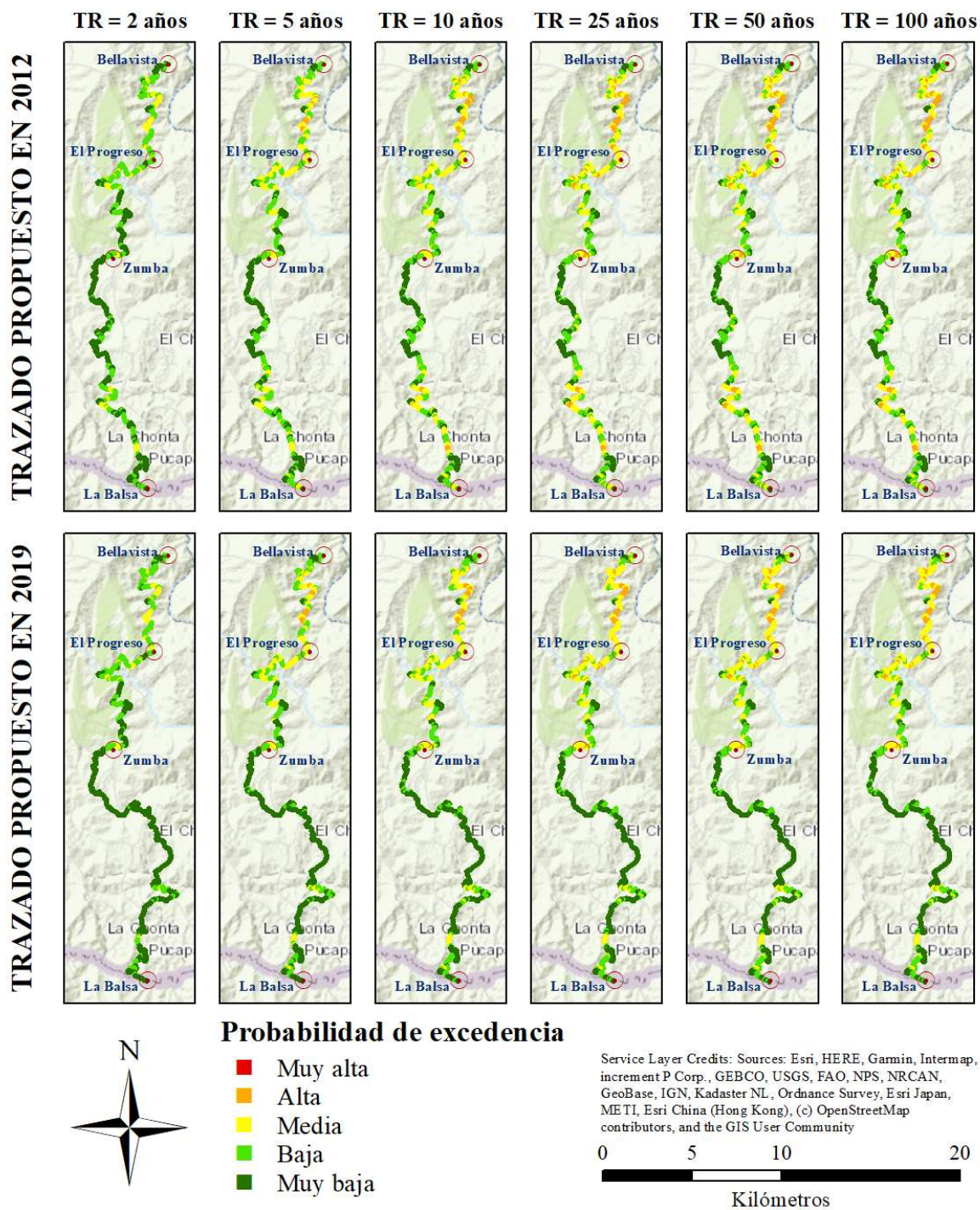


Figura 34. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 2. Fuente: elaboración propia

3.6.3 Resultados Caso 3

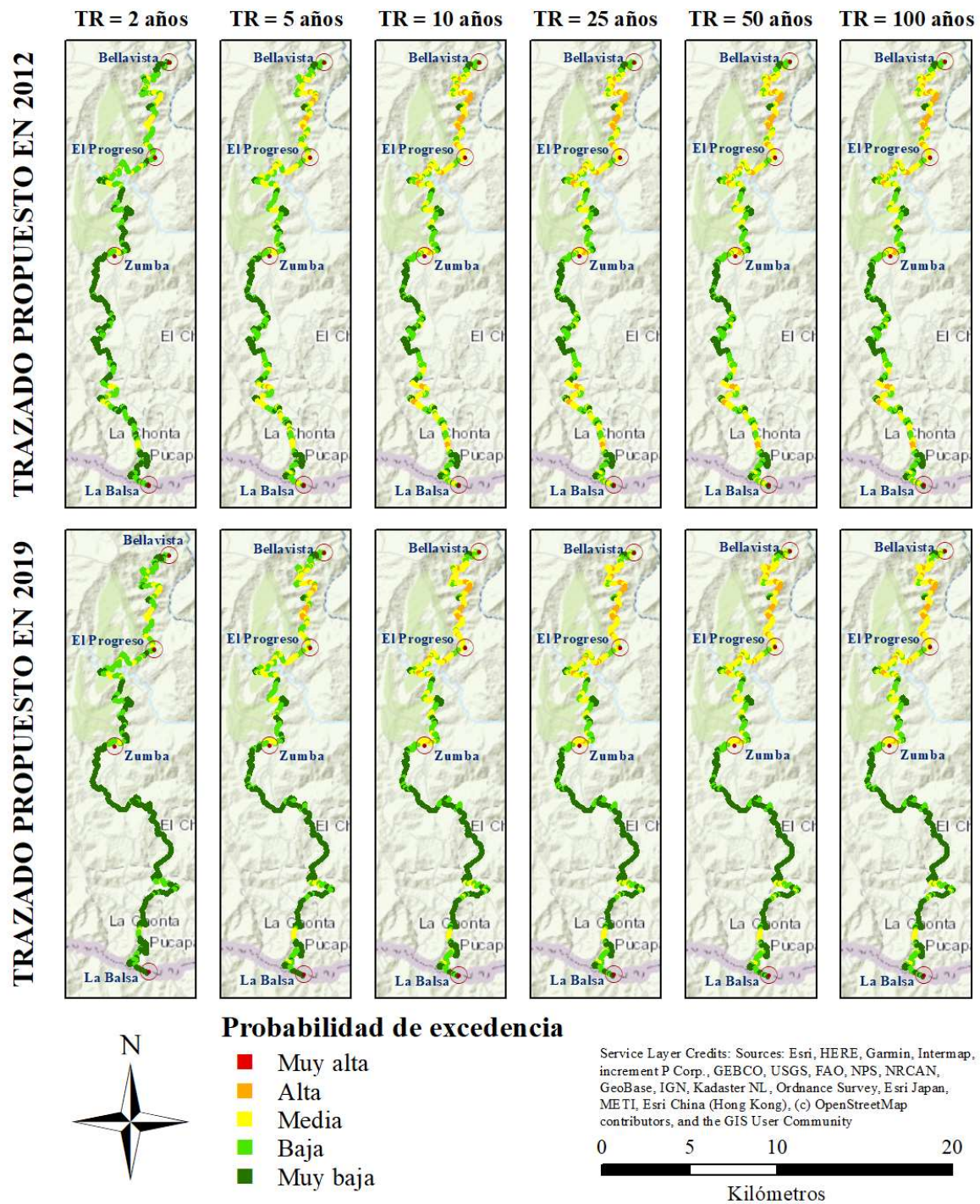


Figura 35. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 3. Fuente: elaboración propia

3.6.4 Resultados Caso 4

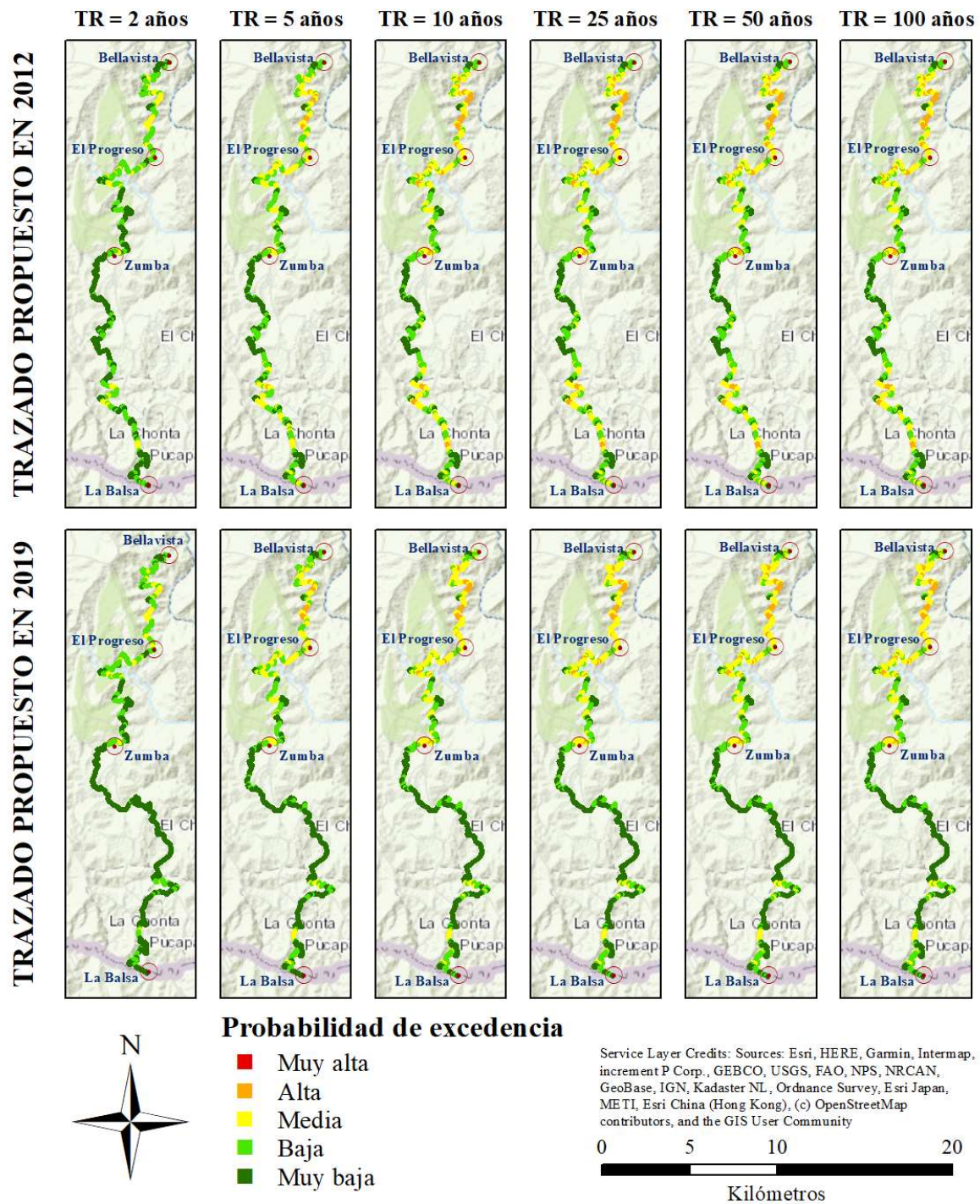


Figura 36. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 4. Fuente: elaboración propia

3.6.5 Resultados Caso 5

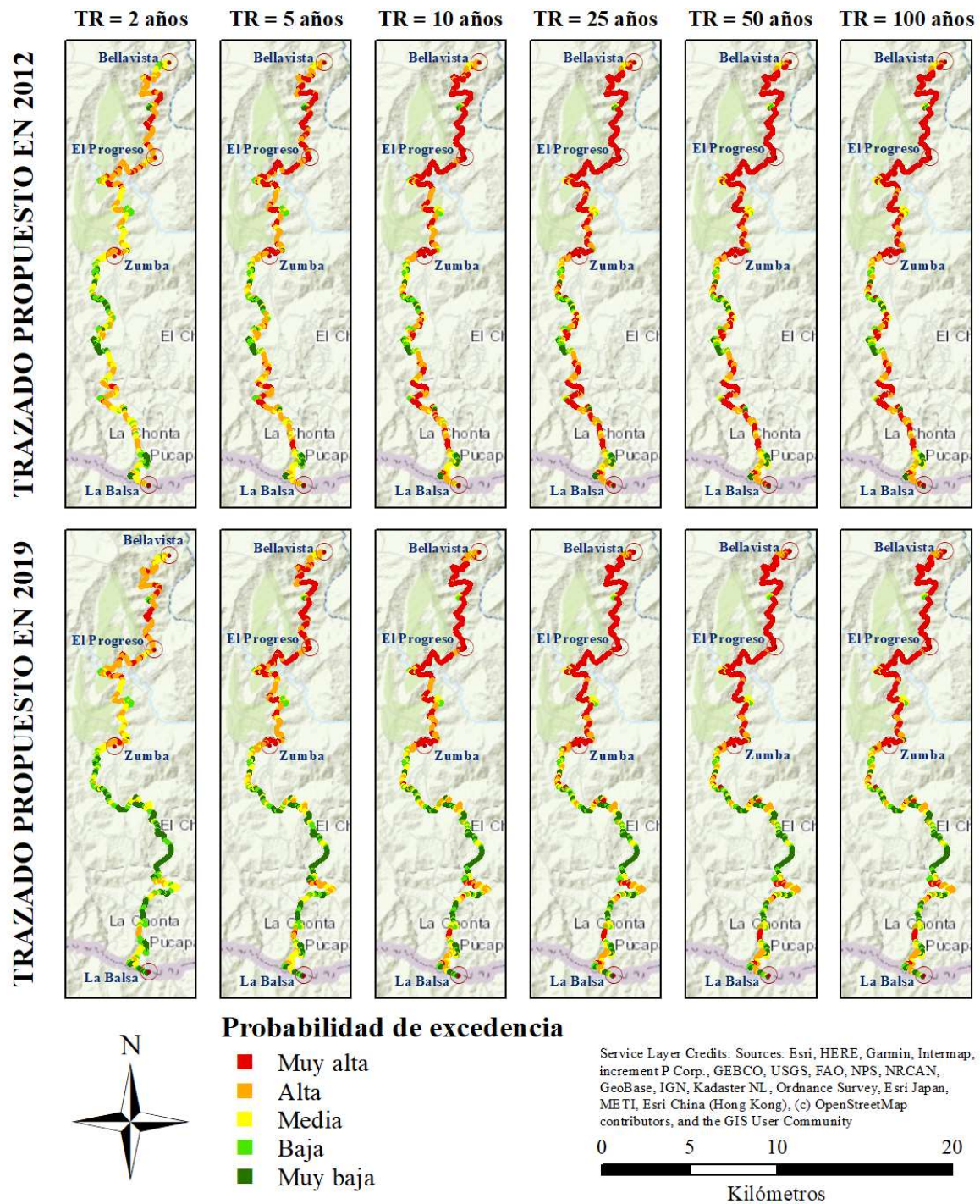


Figura 37. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 5. Fuente: elaboración propia

3.6.6 Resultados Caso 6

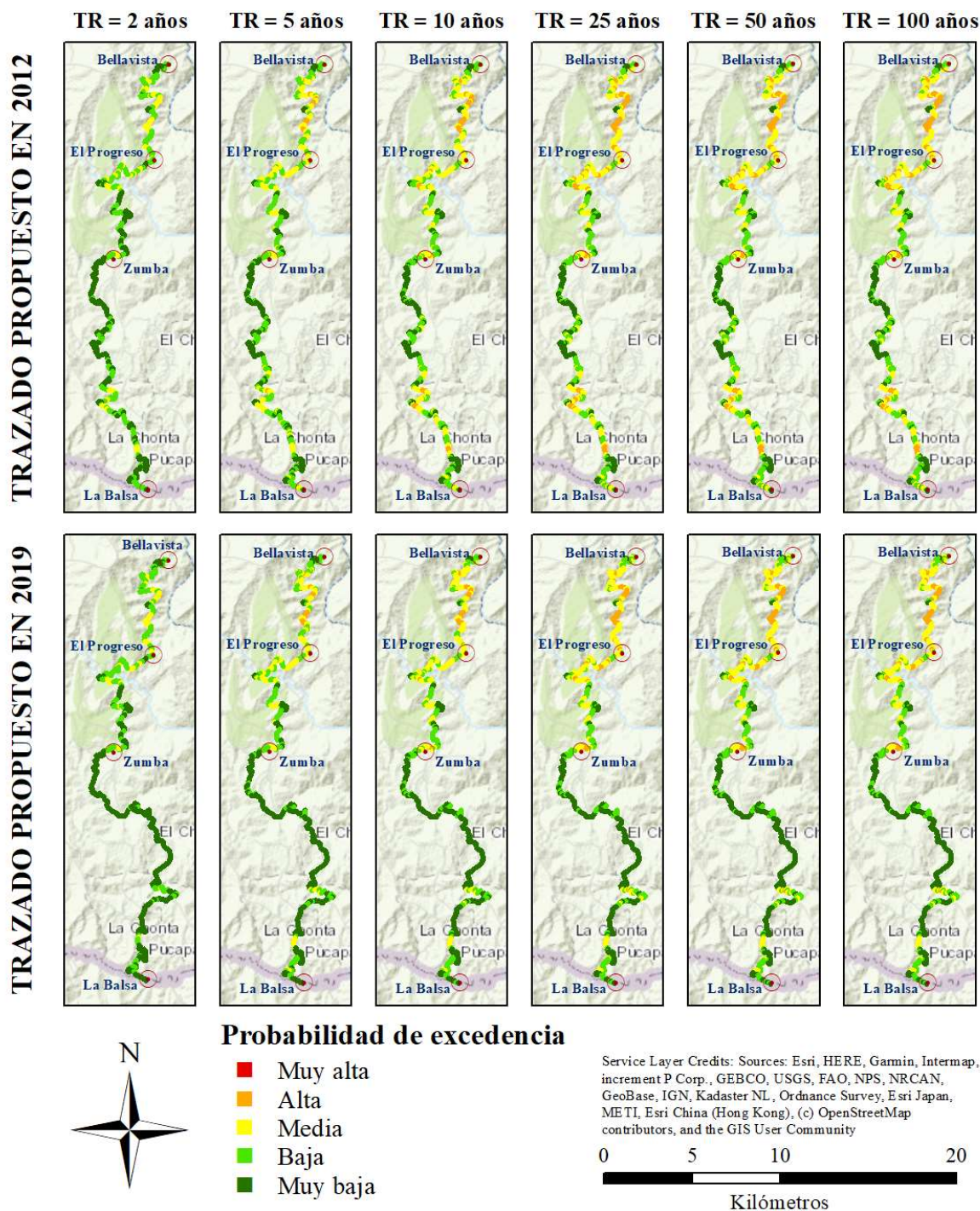


Figura 38. Susceptibilidad a deslizamientos Caso 6. Fuente: elaboración propia

3.6.7 Resultados Afectación en poblaciones

La susceptibilidad en los centros poblados fue analizada en los casos 2, 3, 4, 5 y 6. Para la evaluación de la susceptibilidad de las poblaciones se considera lo siguiente:

- Se verifica la ubicación geográfica de la población con respecto a las zonas críticas.
- Se evalúa la susceptibilidad en las zonas urbanas, como se puede ver en la Figura 39. Como se puede observar en esta figura, el trazado propuesto en 2012 evita las poblaciones de El Tablón, El Chorro y Pucabamba.
- El valor de susceptibilidad resultante es el valor promedio obtenido en el área asignada a cada población.

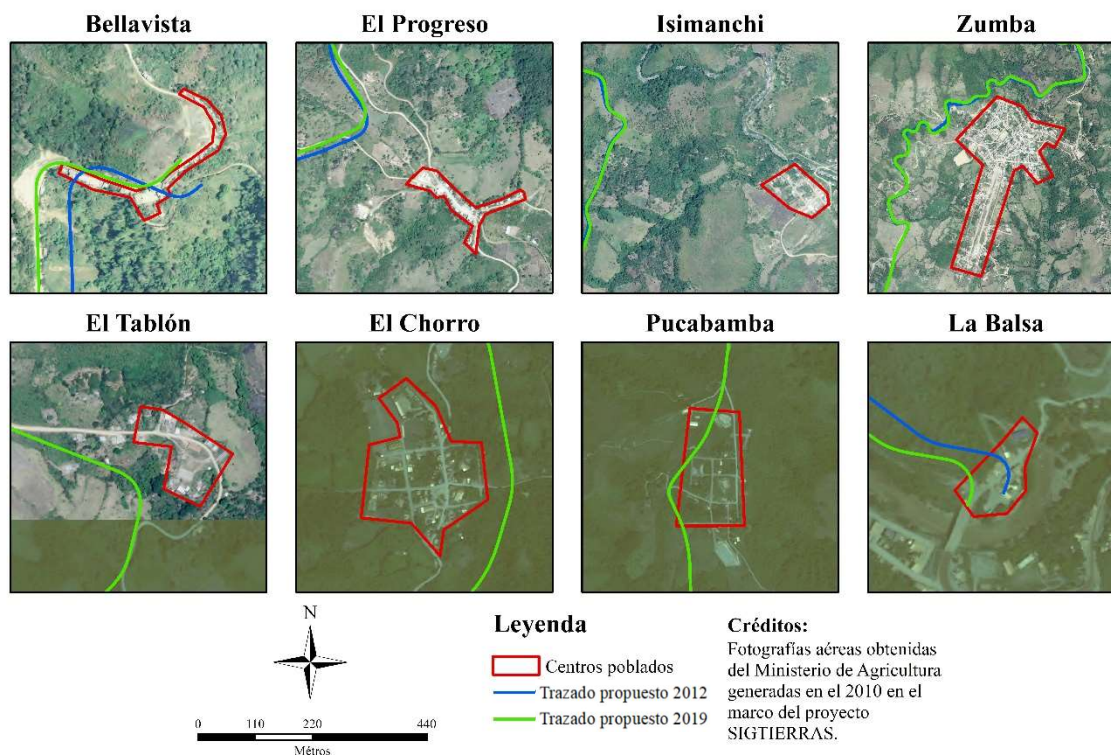


Figura 39. Centros poblados analizados. Fuente: elaboración propia

La vía tiene afectaciones en 8 centros poblados urbanos. La población identificada en el Censo del 2010 se presenta en la Tabla 10. Como se puede observar no se encuentran datos en el censo para las poblaciones de El Progreso, Isimanchi, El Tablón y La Balsa. Estas

poblaciones son menores y se espera una cantidad de pobladores en cada una de estas menores a los 500 habitantes.

Tabla 10. Población total centros urbanos

Parroquia	Población (Ha.)	Área urbana aproximada (m ²)
Bellavista	301	9,074
El Progreso	-	16,424
Isimanchi	-	44,276
Zumba	6,878	769,446
El Tablón	-	17,522
El Chorro	216	71,617
Pucabamba	118	100,231
La Balsa	-	9,764
Total	7,513	1,038,383

Los resultados se presentan desde las Figura 40 hasta la Figura 44. En estas se puede observar que las poblaciones con mayor riesgo son las poblaciones de Bellavista y El Progreso. La susceptibilidad se puede considerar baja en las poblaciones de La Balsa y Pucabamba y muy baja en las poblaciones de Zumba, El Tablón y El Chorro. Vale la pena aclarar que los riesgos analizados son actuales y no son generados por la construcción de la vía. Esto se debe a que desde el diseño de la vía se determinó que esta no puede pasar por el medio de ningún centro urbano pues implicaría una afectación social adicional.

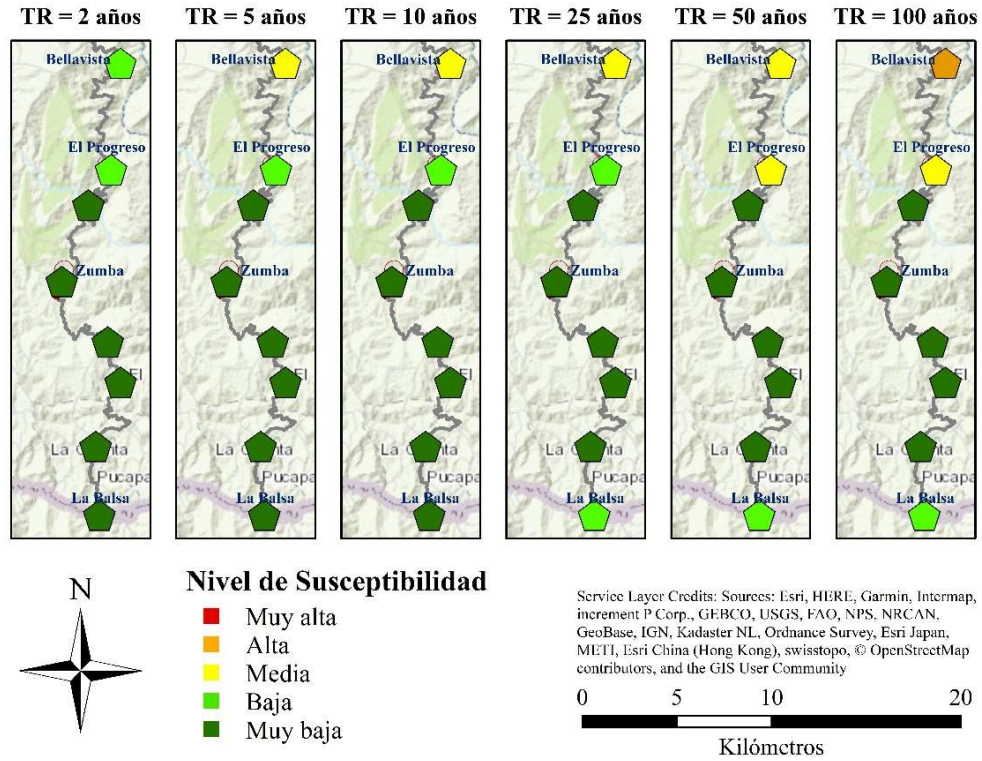


Figura 40. Susceptibilidad Caso 2 en centros poblados. Fuente: elaboración propia

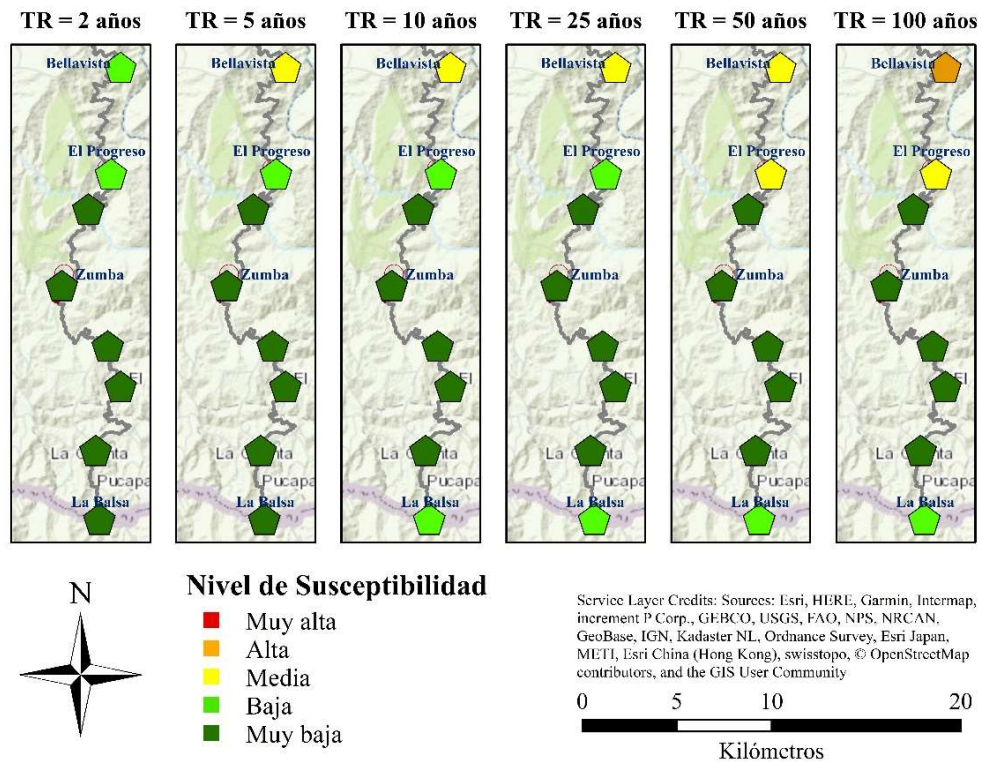


Figura 41. Susceptibilidad Caso 3 en centros poblados. Fuente: elaboración propia

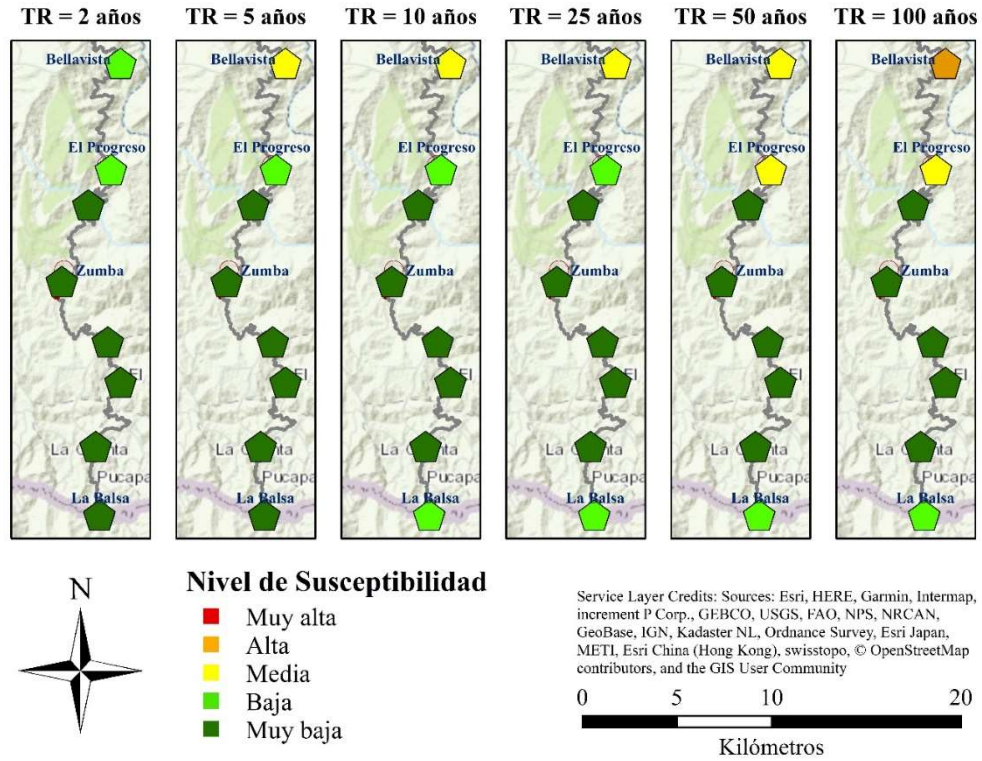


Figura 42. Susceptibilidad Caso 4 en centros poblados. Fuente: elaboración propia

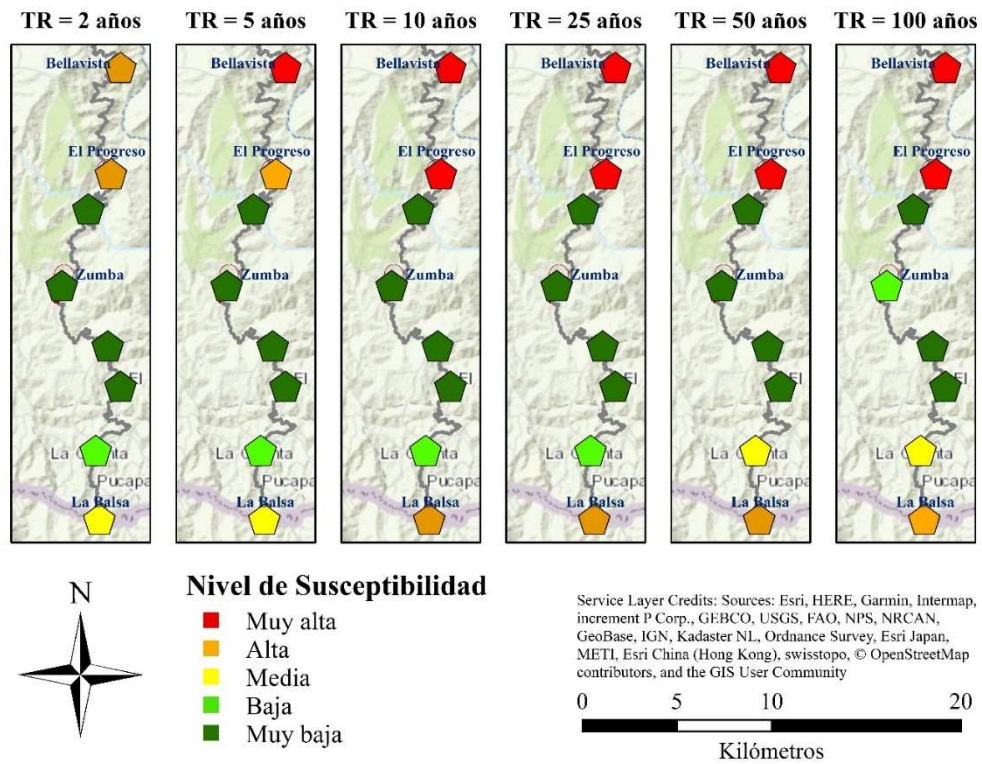


Figura 43. Susceptibilidad Caso 5 en centros poblados. Fuente: elaboración propia

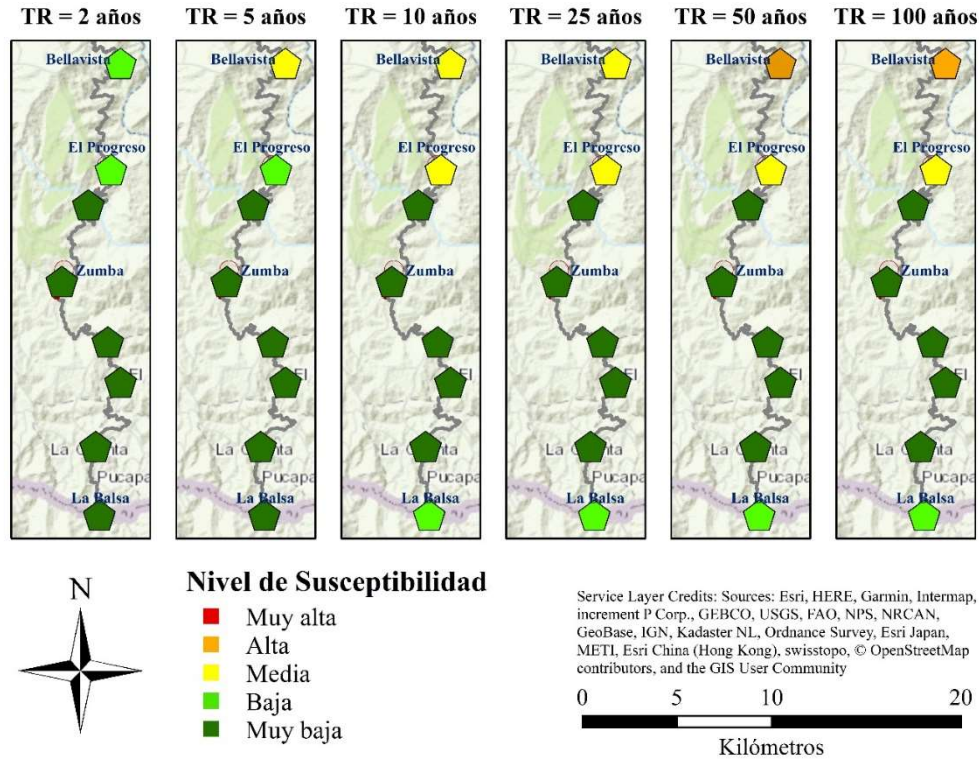


Figura 44. Susceptibilidad Caso 6 en centros poblados. Fuente: elaboración propia

3.7 SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES

3.7.1 Generalidades

Este numeral presenta los resultados de un análisis simplificado de susceptibilidad a las inundaciones en ambos ejes posibles de la vía (actual y el propuesto en 2012). Esta actividad se realizó con el propósito de identificar si existen posibles zonas donde las condiciones puedan generar inundaciones generadas por el tránsito de crecientes en los diferentes cauces que conforman las cuencas de influencia en el área del estudio. Estos resultados son indicativos y deben servir como guía para el diseño del eventual proyecto de obras en etapas posteriores. En las siguientes secciones se presenta la metodología general, la información base y los resultados que se obtuvieron para ambos casos.

3.7.2 Metodología

El termino inundaciones en este capítulo hace referencia a eventos que tienen ocurrencia en las zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos, así como lugares en donde el agua es propensa a estancarse por la topografía y salirse de su cauce natural. Por esta razón, la

metodología propuesta emplea un modelo de encharcamiento en el cual se busca considerar los diferentes factores que contribuyen a la generación de inundaciones de este tipo. Entre estos se consideran la pluviosidad, la topografía, el tipo y el uso de suelo. Los pasos principales para el desarrollo del modelo simplificado son:

1. Análisis general de información diaria de lluvias en la zona utilizando para el efecto las estaciones más importantes y que tengan la información de mayor calidad. En caso de no disponer de lo anterior se utilizan las curvas Profundidad-Duración-Frecuencia (PDF) o de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) obtenidas de fuentes secundarias. Con esta información se elabora un mapa general de isohietas simplificado con el fin de identificar aquellas zonas en que se producen los mayores niveles de precipitación.
2. Cálculo de un indicador de cantidad de lluvia sobre cada celda en que se haya dividido el área de estudio. Este indicador depende de la información disponible que se obtuvo anteriormente.
3. Obtención de la precipitación efectiva sobre cada celda a partir de la metodología del Número de Curva (CN en adelante) del Soil Conservation Service (Cronshey, 1986), el cual emplea la información sobre tipo y uso del suelo para establecer el volumen de esorrentía.
4. Identificación de las áreas de drenaje para cada celda a partir de la información topográfica y el cálculo del caudal de esorrentía potencialmente acumulable que se obtiene al agregar la precipitación efectiva sobre el área de drenaje.
5. Evaluación simplificada de la profundidad de inundación representativa en cada celda a partir del caudal acumulable y de la pendiente. Para esto se utiliza la fórmula de Manning (Chow, 1994) (Ecuación 3), la cual permite relacionar la profundidad de flujo con la pendiente y el caudal para flujo uniforme. A partir de esta ecuación se deriva una expresión que permita conocer dicha profundidad en función del caudal y la pendiente de la zona. A pesar de que no existe una solución explícita para la profundidad de la ecuación de Manning, es posible hacer aproximaciones numéricas de tipo potencial para un rango de caudales y pendientes determinado. Los resultados de este análisis arrojan que la profundidad se puede estimar mediante una función

potencial de la pendiente y el caudal en donde los exponentes promedio para cada una de estas variables son -0.3 y 0.6 para la pendiente y el caudal respectivamente.

$$Q = \frac{1}{n} * by * \left(\frac{by}{b + 2y} \right)^{2/3} * S^{1/2} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde, Q es el caudal, y es la profundidad del flujo, n es el coeficiente de rugosidad de Manning del canal, b es el ancho del canal, y S es su pendiente.

6. Identificación de zonas susceptibles a las inundaciones a partir de los resultados del análisis simplificado.

La anterior metodología fue aplicada haciendo de los siguientes programas de computador:

- Análisis de información pluviométrica: Software *IT-Precipitación*.
- Evaluación simplificada de inundaciones: sistema de información geográfica *ArcGIS*

3.7.3 Información base

Las principales fuentes de información para el desarrollo del modelo simplificado de inundaciones de los dos posibles tramos viales fueron:

- Datos hidrometeorológicos: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador (INAMHI)
- Datos de usos del suelo y capa vegetal: Ministerio del Ambiente de Ecuador, Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador, Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo

Para el caso de los datos pluviométricos diarios no fue posible obtener la información durante el desarrollo del estudio por lo que se recurrió a una fuente secundaria. Se utilizó la información contenida en las curvas IDF generadas a nivel país en (INAMHI, 2015). En este caso particular se seleccionó como indicador de cantidad de lluvia la precipitación diaria máxima para un periodo de retorno de 2 años, el cual indica zonas propensas a eventos recurrentes. En la Figura 45 se presenta la profundidad de lluvia para la zona de estudio, la cual se encuentra en torno a los 60 mm/día.

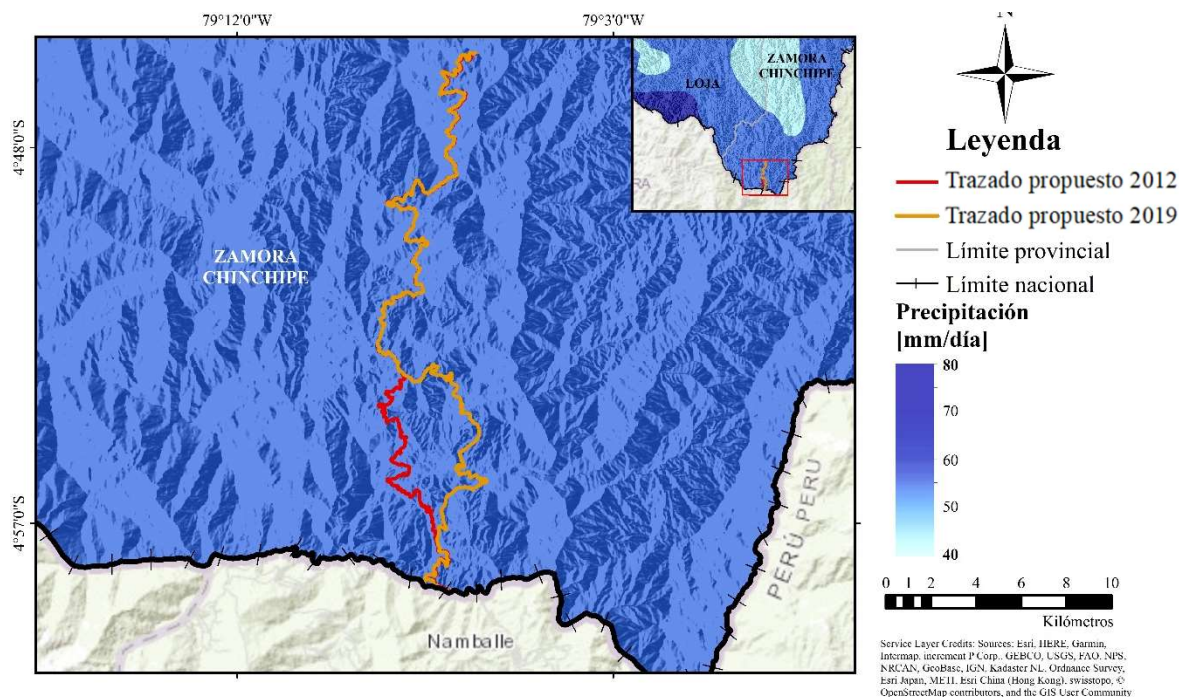


Figura 45. Indicador de precipitación total diaria sobre el área de estudio. Adaptada del Mapa No°49 de (INAMHI, 2015)

El CN para el cálculo de la precipitación efectiva fue generado como parte del estudio con la información de usos de suelo y de tipos de suelo que se obtuvieron del geo-portal del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador. La zona se caracteriza por tener un uso mayoritario de tipo pastizal y bosque nativo y con un tipo de suelo *inceptisol*, el cual tiene un alto contenido arcilloso y una capacidad de drenaje muy baja (Ministerio de Agricultura y Ganadería , 2003), por lo que la mayoría de volumen de agua que recibe por precipitación se transforma en escorrentía. Los valores de CN se presentan en la Figura 46 y para ambos tramos viales está en el orden de 90 con sectores específicos de 80, en su mayoría en el trazado actual.

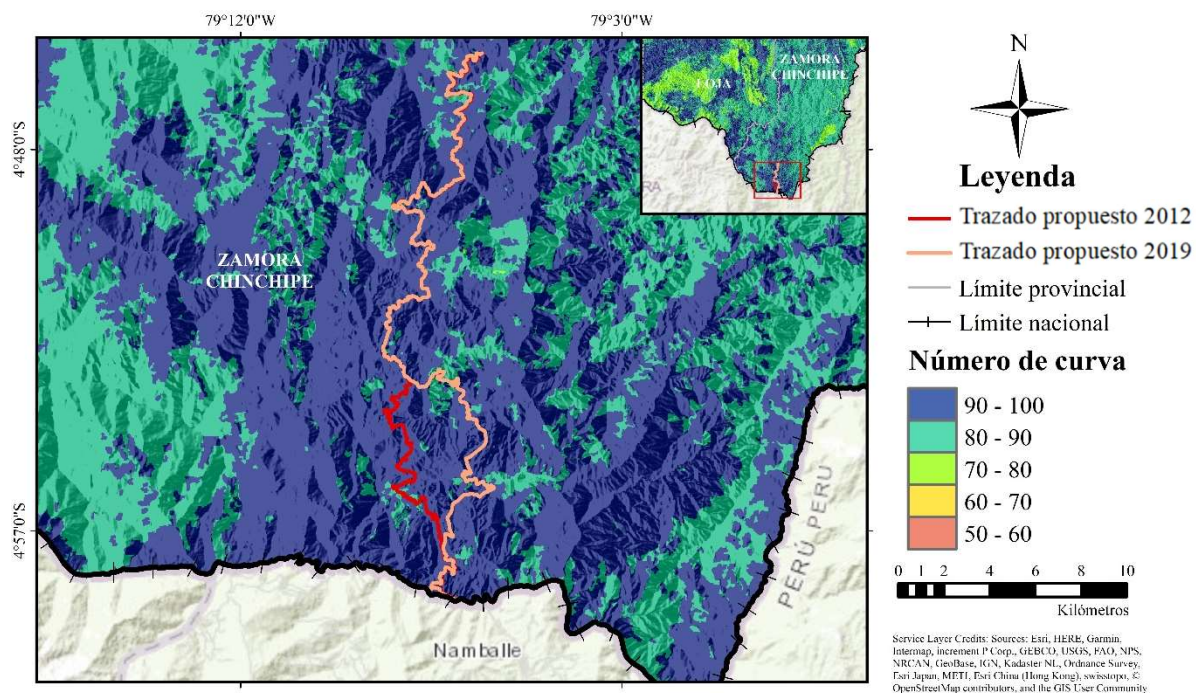


Figura 46. Número de curva en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia

Finalmente, la topografía es la misma que se empleó para la susceptibilidad a los deslizamientos que corresponde a la imagen satelital ALOS World 3D de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (Jaxa), con 30 m de resolución horizontal y 5 m de precisión vertical.

3.7.4 Resultados

Al aplicar la metodología se obtiene el mapa de susceptibilidad a las inundaciones de la Figura 47. De este mapa se concluye que ambos trazados se encuentran en una zona de baja susceptibilidad a este tipo de eventos, por lo que no es necesario realizar un análisis más detallado al respecto. También es posible concluir que las poblaciones aledañas a los trazados presentan una baja susceptibilidad a inundaciones. Estos resultados eran los esperados por las condiciones topográficas de la zona, una región montañosa de alta pendiente en donde la acumulación de agua es baja o prácticamente nula. Así mismo, esta información fue corroborada por las agencias gubernamentales locales, las cuales no tienen registros de eventos de inundación en el sector. Sin embargo, por estas mismas razones, los resultados

indican que en la zona si es posible que se presenten eventos de descargas torrenciales, tema que se desarrolla en el siguiente numeral.

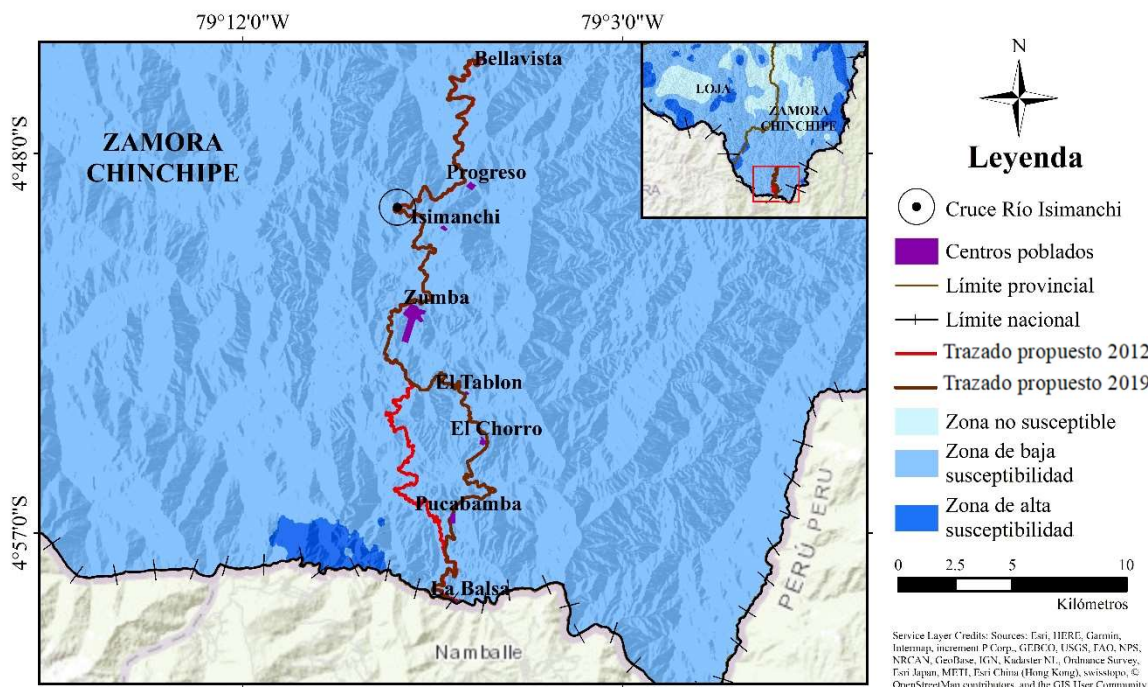


Figura 47. Susceptibilidad a inundación para los dos trazados viales. Fuente: elaboración propia

3.8 SUSCEPTIBILIDAD A DESCARGAS TORRENCIALES

3.8.1 Generalidades

Este numeral presenta los resultados de un análisis simplificado de susceptibilidad a descargas o avenidas torrenciales en ambos ejes posibles de la vía actual y el propuesto en 2012. Esta actividad se realizó con el propósito de identificar las posibles zonas y los puntos donde una posible descarga torrencial pudiera afectar la vía. Estos resultados son indicativos y deben servir únicamente como guía para el desarrollo de estudios más detallados en etapas posteriores. En las siguientes secciones se presenta la metodología general, la información base y los resultados que se obtuvieron de este análisis simplificado.

3.8.2 Metodología

Una descarga torrencial hace referencia a episodios de flujos rápidos formados por una mezcla caótica de agua y sólidos. Típicamente se dan en cuencas de montaña con fuertes gradientes y áreas menores a los 100 km². Las lluvias fuertes en tiempos cortos son las

principales generadoras de este tipo de eventos y sus efectos se incrementan a causa de la falta de cobertura vegetal e impermeabilización del suelo. Las descargas torrenciales se caracterizan por su velocidad de ocurrencia, la cual no da tiempo a una respuesta adecuada, y a su poder destructivo capaz de dañar infraestructura vial o edificaciones expuestas ante esta amenaza.

Para el análisis de susceptibilidad ante descargas torrenciales se utiliza una metodología simplificada que emplea las características geomorfológicas de las cuencas y las asocia con el potencial de ocurrencia de este tipo de eventos. Dicha metodología se ha venido utilizando para poder priorizar las cuencas que requieren un estudio a detalle y una posterior intervención. Para mayor detalle el lector se puede referir a (Bajabaa, Masoud, & Al-Amri, 2014; Farhan & Ayed, 2017; Mahmood & Rahman, 2019). Los pasos principales para el desarrollo del modelo simplificado son:

1. Identificación de cuencas y cauces en la zona de análisis por medio del modelo digital del terreno con la mejor resolución disponible.
2. Depuración de cuencas al seleccionar aquellas menores a 100 km². Mayores áreas por tener tiempos de concentración más altos no se consideran susceptibles a descargas torrenciales.
3. Caracterización geomorfológica de cada cuenca al calcular los parámetros de forma, relieve y drenaje indicados de la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros geomorfológicos empleados en metodología simplificada

Tipo	Parámetro
Forma	Área
	Perímetro
	Longitud de la cuenca
	Coefficiente de compacidad
	Razón de Circularidad
	Razón de elongación
	Factor de forma
Relieve	Desnivel absoluto
	Razón de relieve
	Gradiente
	Número de rugosidad
Drenaje	Orden de la cuenca
	Numero de cauces
	Longitud de cauces
	Índice de frecuencia
	Densidad de drenaje
	Longitud de flujo superficial

4. Normalización lineal de los parámetros geomorfológicos en una escala de 1 a 5. Siendo 1 un parámetro que no aporta a la susceptibilidad y 5 uno que la aumenta directamente. Para esto se divide el análisis en dos grupos según si son inversa o directamente proporcionales a la susceptibilidad. El primero comprende la razón de elongación, el factor de forma, el coeficiente de compacidad y la longitud de flujo superficial. El segundo contiene los parámetros restantes. Para la normalización se usa la Ecuación 4 y la Ecuación 5 respectivamente. Esta clasificación se realiza con base en experiencia internacional y bibliografía científica en otras cuencas (Mahmood & Rahman, 2019).

$$X_N = 4 \left(\frac{X - X_{max}}{X_{min} - X_{max}} \right) + 1 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$X_N = 4 \left(\frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right) + 1 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde X_N es la variable normalizada, X es la variable original, y X_{min} y X_{max} es el menor y mayor valor respectivamente de la variable analizada entre todas las cuencas.

5. Obtención de un indicador geomorfométrico por cuenca al sumar los valores normalizados de todos los parámetros.
6. Identificación de la susceptibilidad a descargas torrenciales a partir de los resultados del análisis simplificado. A partir de estos resultados se clasifica la susceptibilidad de cada cuenca en Alta, Media o Baja. Vale pena resaltar que la clasificación es relativa para las cuencas de estudio.

La anterior metodología fue aplicada haciendo uso del sistema de información geográfica *ArcGIS*.

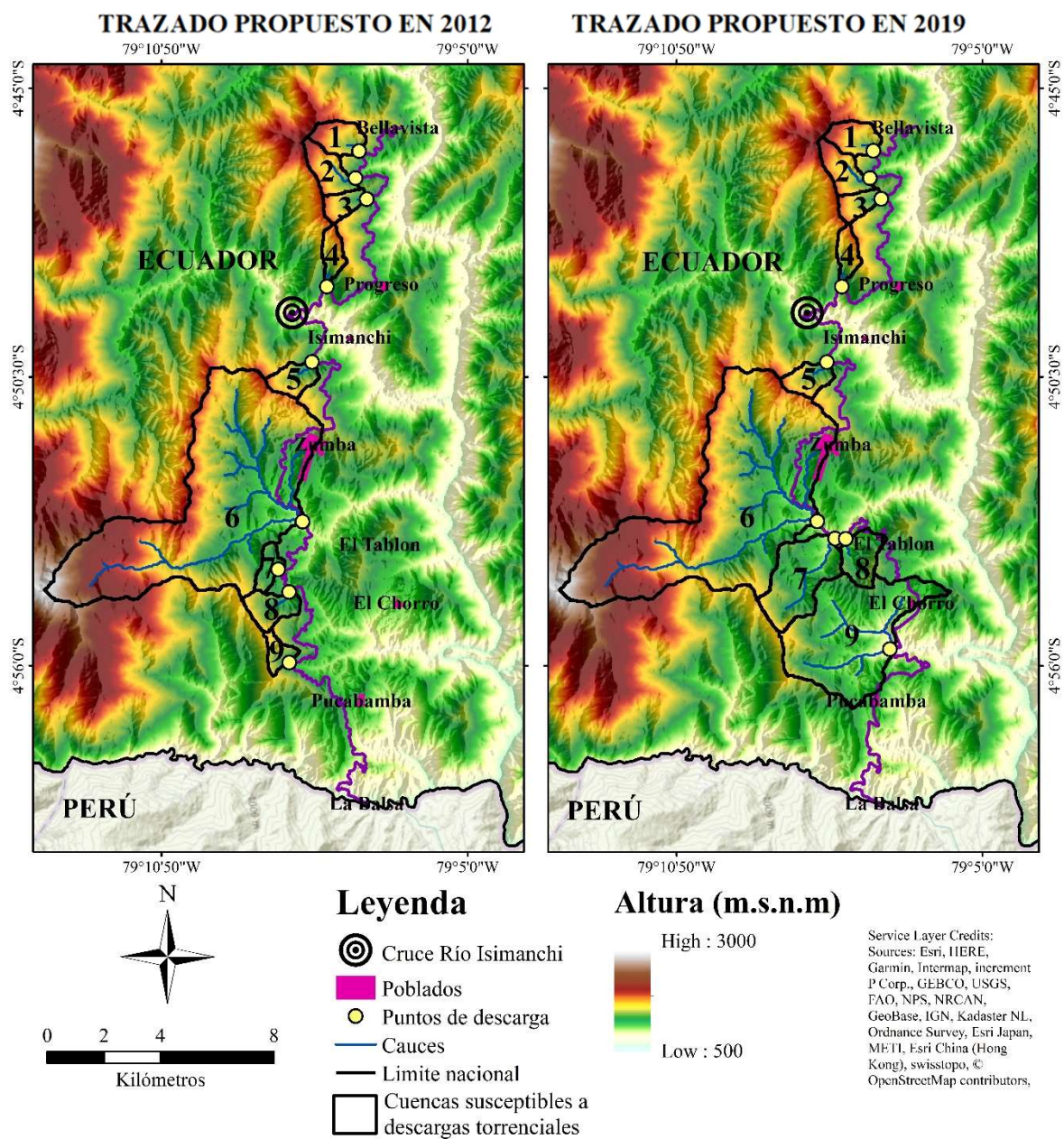
3.8.3 Resultados

Por la localización de los posibles ejes viales en una zona montañosa con altas pendientes y cuencas de tamaño mediano se han encontrado puntos sobre la vía susceptibles a eventos de descargas torrenciales. Esta información ha sido verificada durante las visitas de campo, en

la cual se detectaron puntos que reciben afluentes menores y que pueden comprometer la funcionalidad y operatividad de la vía.

Para la aplicación de la metodología se usó la misma información topográfica que en el caso de susceptibilidad a deslizamientos e inundaciones, la imagen satelital ALOS World 3D de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (Jaxa), con 30 m de resolución horizontal y 5 m de precisión vertical. A partir de esta información se detectaron las cuencas que se presentan en la Figura 48 para los dos posibles ejes viales. Para ambos trazados se detectaron un total de nueve puntos susceptibles a descargas torrenciales, ubicados principalmente al inicio y al final del eje vial. A las cuencas identificadas se les aplicó la metodología simplificada con el propósito de priorizarlas e identificar los puntos más críticos. El resultado se presenta en la Figura 49.

Se puede concluir que la cuenca más grande para ambos ejes viales es la más crítica. Esto se debe a que puede recibir más aportes pluviales por tener una mayor área y por la forma achatada de la cuenca, la cual concentra el escurrimiento y por tanto unos picos de hidrograma más altos con mayor fuerza para transportar sólidos. Las cuencas restantes para ambos casos son de menor tamaño y se priorizaron en función del desnivel e impermeabilidad. Aquellas con mayor gradiente e impermeabilidad tienen un menor tiempo de concentración y por tanto tienen un mayor potencial destructivo para la vía. Estos puntos deben ser priorizados al momento de diseñar las estructuras de control, disipación de energía y cruce del agua para evitar daños en la vía. Para las cuencas menores no identificadas aquí, debe haber una captación adecuada por cunetas que transporte el agua de manera controlada hacia los afluentes que cruzarán la carretera. Vale la pena aclarar que el punto de cruce de la vía con el Río Isimanchi no es incluido como un punto crítico de descarga torrencial pues no tiene potencial de generar flujos de tierra por el gran tamaño de su cuenca. Sin embargo, el caudal y la capacidad de arrastre de sedimentos a menor velocidad indican que se debe considerar como un punto crítico en el diseño de la vía por lo que debe diseñarse un puente teniendo en cuenta estas condiciones. Por último, se puede concluir que las poblaciones aledañas a la vía no están afectadas directamente por descargas torrenciales, la población más cercana a estos puntos es El Tablón para el trazado propuesto en 2019.



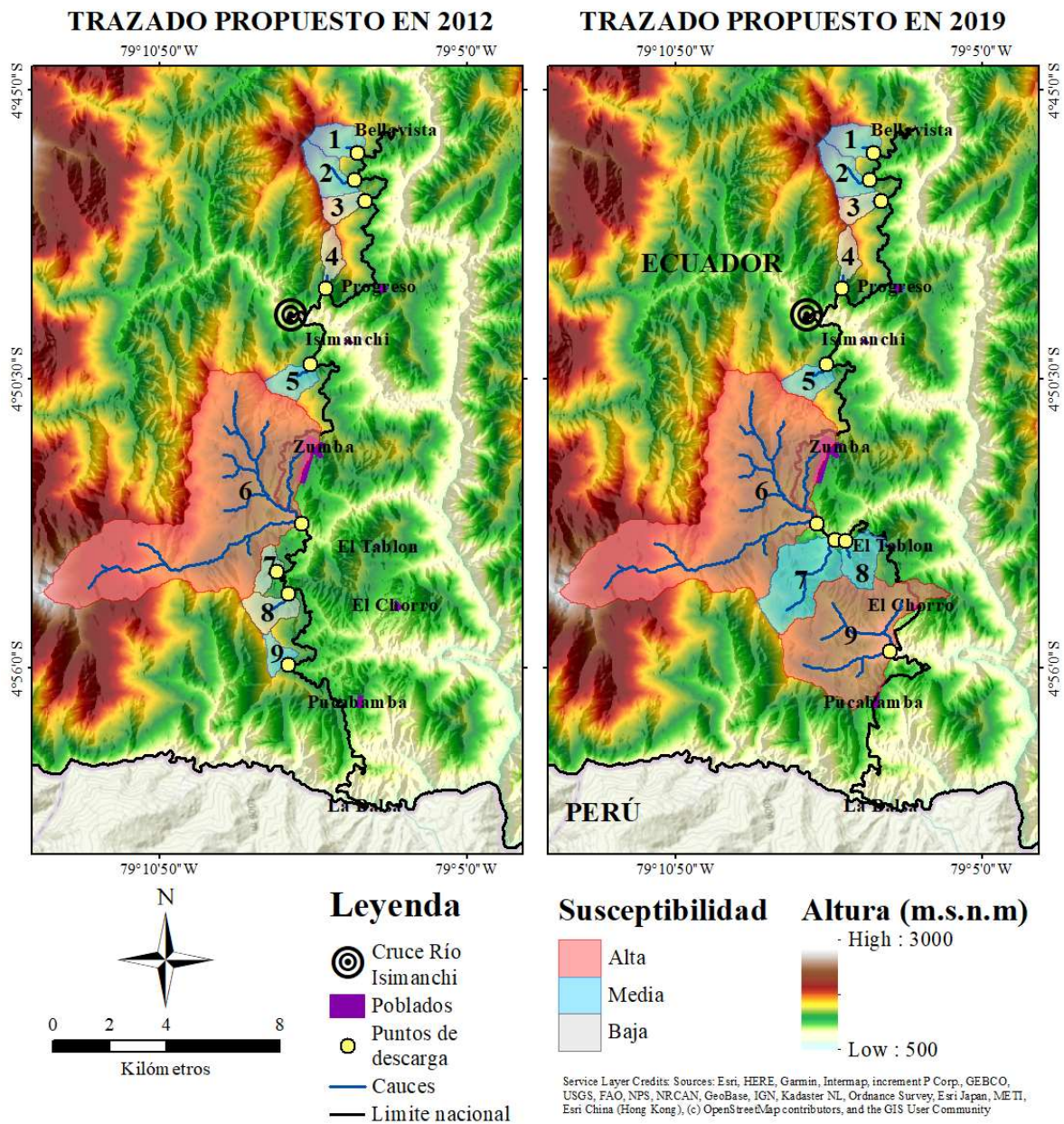


Figura 49. Susceptibilidad a descargas torrenciales en las cuencas de los dos posibles. Fuente: elaboración propia

4. EVALUACIÓN DEL RIESGO Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN

4.1 Enfoque Metodológico

La evaluación del riesgo en términos probabilistas en el presente estudio se lleva a cabo mediante el siguiente procedimiento simplificado, el cual se aplica a la amenaza por lluvias:

- a) Seleccionar el conjunto de eventos estocásticos de análisis, consistentes en las simulaciones anuales (1000) de precipitación para los doce meses del año. Los casos corresponden a la estimación para la información histórica disponible actualmente y para los escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5.
- b) Asignar a cada punto crítico identificado en el reconocimiento geológico (sección 3.3) una función de vulnerabilidad en las condiciones iniciales la cual relaciona la intensidad de la lluvia mensual (mm/mes) con el volumen estimado de material deslizado, el cual a su vez es función del tipo de proceso erosivo característico de cada sitio.
- c) Llevar a cabo el análisis de riesgo que consiste en evaluar en cada sitio crítico el volumen de material inestable o deslizado para cada evento, al igual que las pérdidas esperadas para cada uno de los (1000) escenarios estocásticos de precipitaciones para los 12 meses del año.
- d) Calcular las pérdidas totales teniendo en cuenta las pérdidas directas relacionadas con los eventuales costos de remoción de escombros y adecuación de la vía y las pérdidas indirectas asociadas al tiempo de interrupción del tráfico.
- e) Representar las pérdidas económicas mediante indicadores como la pérdida anual esperada (PAE) y la pérdida máxima probable para diferentes periodos de retorno (PMP).
- f) Identificar y cuantificar las medidas de mitigación viables desde el punto de vista técnico y económico en cada uno de los sitios críticos que permitan una adecuada reducción del riesgo de inestabilidad o deslizamiento.
- g) Llevar a cabo una evaluación preliminar de los costos asociados a la implementación de las obras de mitigación propuestas en cada punto crítico mediante un análisis de precios unitarios y cantidades asociadas a la geometría esperada de la zona inestable.

- h) Evaluar el riesgo para las condiciones luego de implementadas las obras de mitigación propuestas en los sitios críticos.
- i) Evaluar los beneficios generados en cada punto crítico luego de implementadas las obras de mitigación propuestas y ante los escenarios estocásticos propuestos.
- j) Evaluar los indicadores de beneficio-costos y eficiencia-costos que permitan definir si las inversiones en obras de mitigación son costo-eficientes y poder establecer una priorización de las mismas para optimizar las inversiones en reducción del riesgo considerando posibles limitaciones en los presupuestos de inversión en la vía.

En la Figura 50 se presenta un esquema que resume el enfoque metodológico propuesto. Vale la pena aclarar que la evaluación de riesgo presentada en los siguientes capítulos está basada en el reconocimiento geológico (capítulo 3.3), la amenaza de lluvia considerando efectos de cambio climático (capítulo 3.4) y la información histórica de deslizamientos que se presenta en el siguiente capítulo. Los resultados de la evaluación de susceptibilidad a inestabilidad del terreno, inundaciones y descargar torrenciales no se incluyen en esta evaluación dadas las limitaciones propias de cada uno de estos.

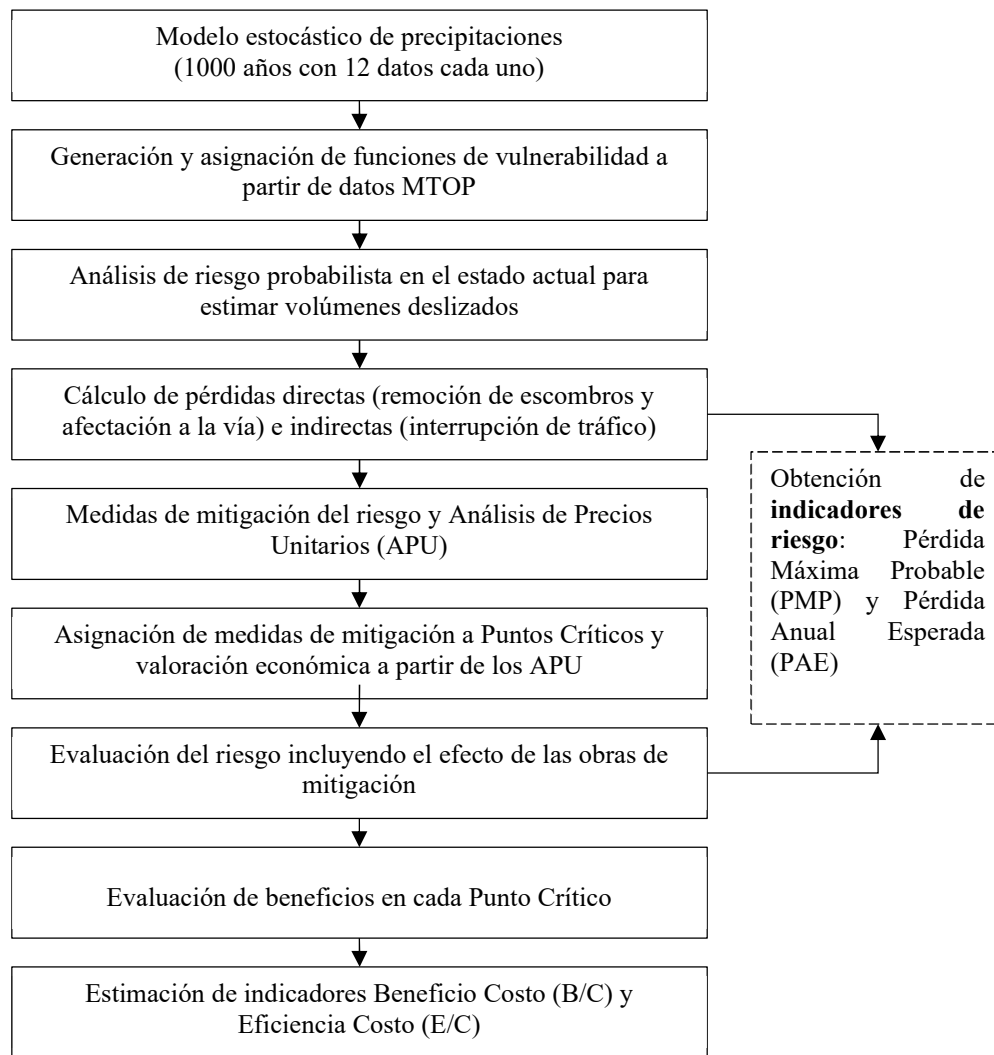


Figura 50. Metodología general de evaluación de medidas estructurales

4.2 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD AL DESLIZAMIENTO

4.2.1 Generación de funciones de vulnerabilidad para deslizamientos

Las funciones de vulnerabilidad se plantean en términos de los volúmenes estimados de suelo inestable o que hace parte del deslizamiento en función de la precipitación acumulada mensual. Se plantean diferentes funciones para cada tipo de proceso erosivo y la geometría respectiva, principalmente a través de la altura y pendiente media de los taludes. Para efectos del presente proyecto, la construcción de las funciones de vulnerabilidad se basó en el análisis estadístico de un catálogo de los deslizamientos ocurridos en la vía actual durante los últimos cuatro (4) años. El catálogo contiene la información de la fecha de ocurrencia, volumen deslizado, ubicación espacial del evento y los equipos requeridos para el movimiento de

tierras. Esta información fue recopilada y enviada directamente por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en su zonal de Zamora-Chinchipe.

Utilizando la información disponible como base para el análisis se obtuvieron las métricas de precipitaciones mínimas requeridas para la ocurrencia del deslizamiento y un volumen unitario deslizado con una confiabilidad del 75%. Esta metodología de resume en la Figura 51.

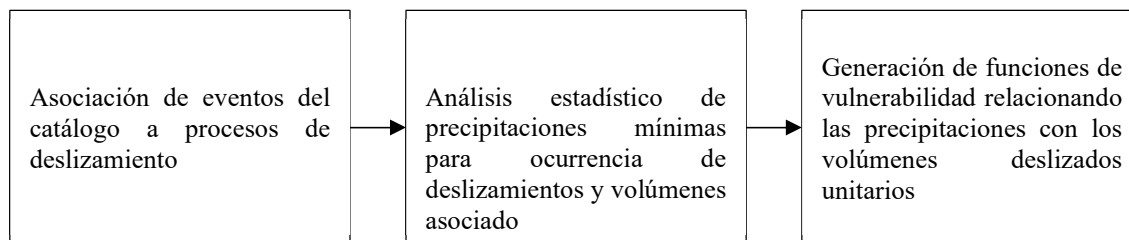


Figura 51. Metodología de construcción de funciones de vulnerabilidad de deslizamientos

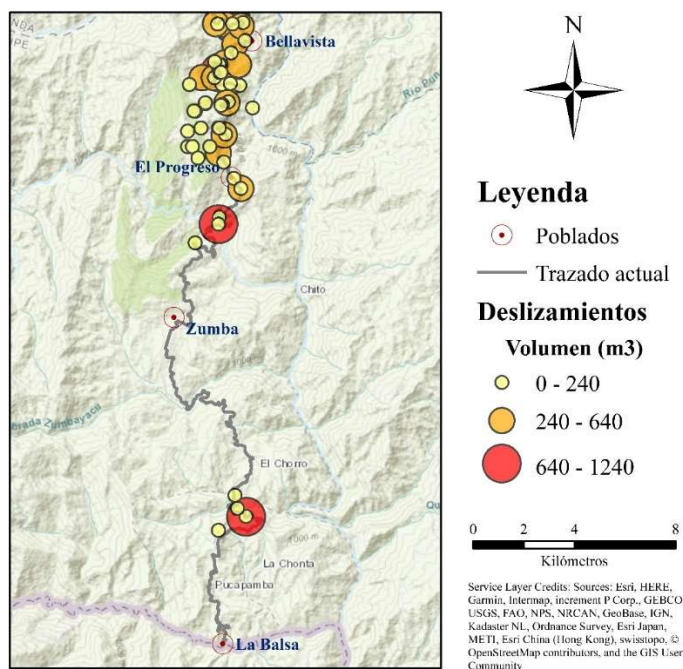


Figura 52. Ubicación espacial de los eventos de deslizamientos del catálogo. Fuente: elaboración propia. Datos recopilados por MTOP

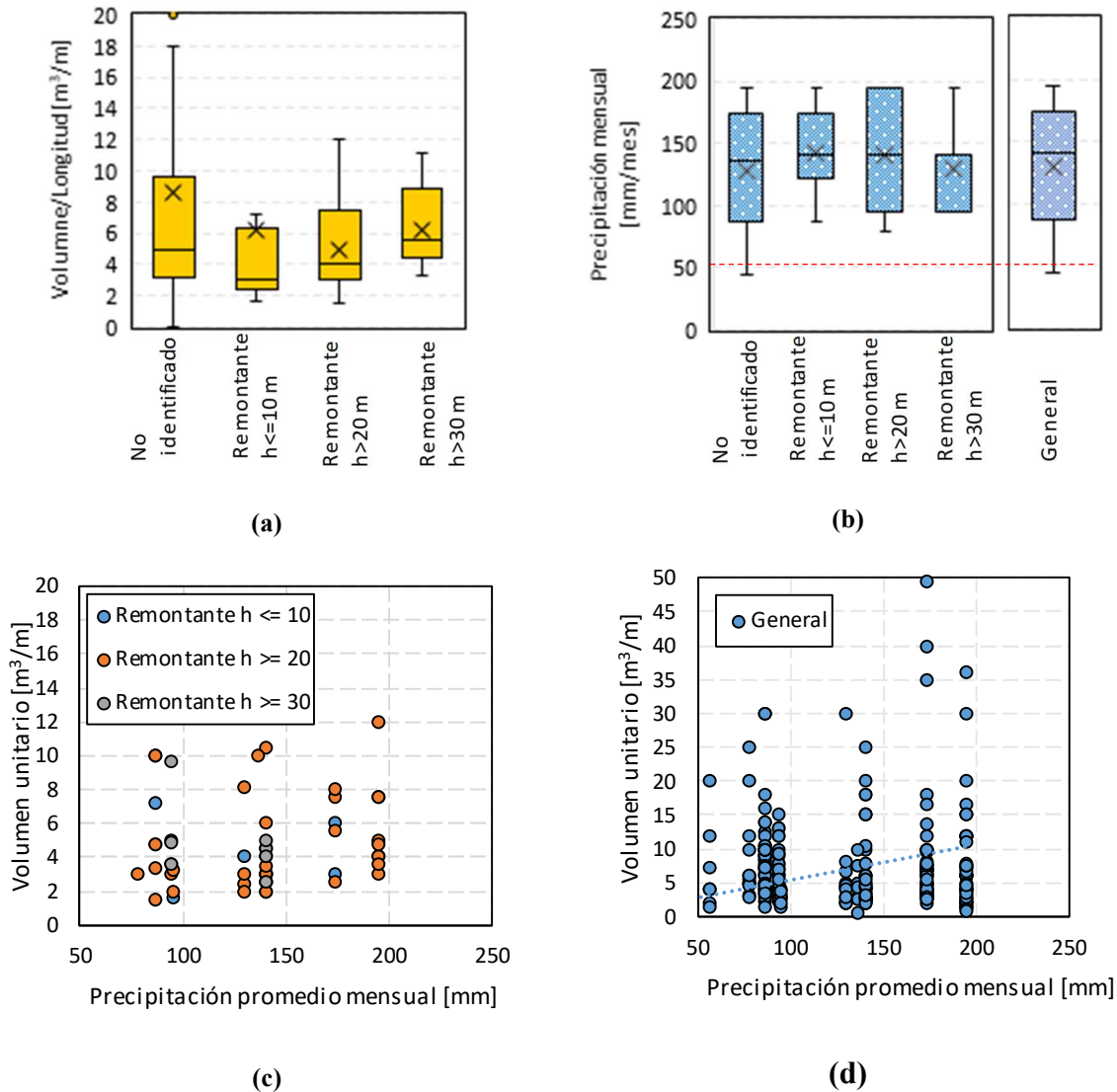


Figura 53. Valores estadísticos de (a) Volúmenes unitarios, (b) precipitaciones promedios mensuales asociadas, (c) relación entre volúmenes unitarios y precipitaciones promedios mensuales de procesos remontantes y (d) relación para el catálogo completo. (Fuente Ministerio de Transporte y Obras Públicas en su zonal de Zamora-Chinchipe)

En la Figura 52 (b) se evidencia que en términos generales los deslizamientos están asociados a una precipitación acumulada mensual mínima (cuartil 25%) de aproximadamente 50 mm (sin diferenciar si es distribuida en el mes o puntual en ciertos días). Adicionalmente, la Figura 53 (d) permite identificar la relación lineal (aunque con alto grado de incertidumbre) entre las precipitaciones mensuales y los volúmenes registrados de deslizamientos. Estas mismas relaciones se encontraron también en catálogos de procesos erosivos semejantes estudiados en la bibliografía (Rickli, 2009).

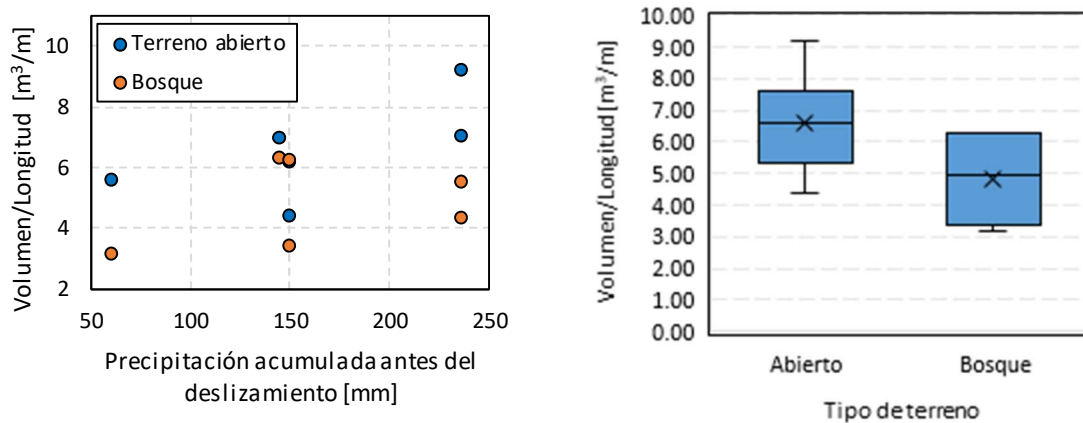


Figura 54. Estadísticas de bases de datos de deslizamientos remontantes recopiladas por Rickli (2009)

Por otra parte, para el caso de los deslizamientos de taludes rocosos, debido a que ningún evento del catálogo estaba asociado a este tipo de procesos, se utilizaron los deslizamientos recopilados por Lumb (1975) correspondientes a materiales graníticos.

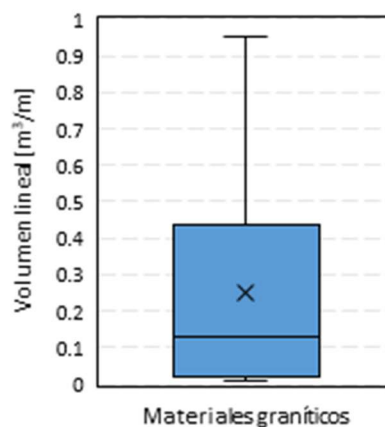


Figura 55. Estadísticas de volúmenes unitarios para deslizamientos en materiales graníticos

A partir de los datos anteriores se generan funciones de vulnerabilidad lineales, validados por los datos encontrados en la literatura y ajustados para asegurar consistencia con datos históricos. Las curvas de vulnerabilidad generadas se muestran en la Figura 56. Estas funciones están acotadas por el volumen límite respectivo (cuartil 75%). Por su parte el rango de precipitaciones se definió iniciando con la precipitación mínima estimada para la ocurrencia de deslizamientos, incrementando hasta una precipitación máxima media característica de la región, según se evidencia en la Figura 26. Para precipitaciones superiores a 400 mm se considera que se desliza el mismo volumen máximo definido.

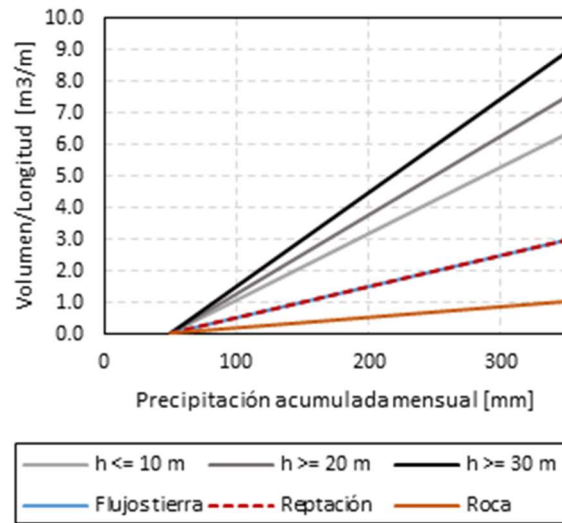


Figura 56. Funciones de vulnerabilidad a deslizamientos para cada proceso de deslizamiento

4.2.2 Validación de la información

Con el fin de validar los resultados obtenidos hasta el momento se realiza una comparación entre los eventos históricos (Figura 57), los resultados obtenidos de los modelos de susceptibilidad (Figura 58) y los resultados obtenidos en la interpretación de fotografías aéreas (Figura 59). La comparación indica que en los resultados obtenidos tanto en la susceptibilidad como en la identificación de puntos críticos son consistentes con los eventos registrados por el MTOP. En particular, se puede observar dos zonas críticas en la vía, la primera desde la abscisa K0+000 hasta la K15+500 y la segunda desde la abscisa K38+000 hasta la K43+500 del trazado propuesto en 2019. Estos resultados se pueden identificar en la Figura 59.

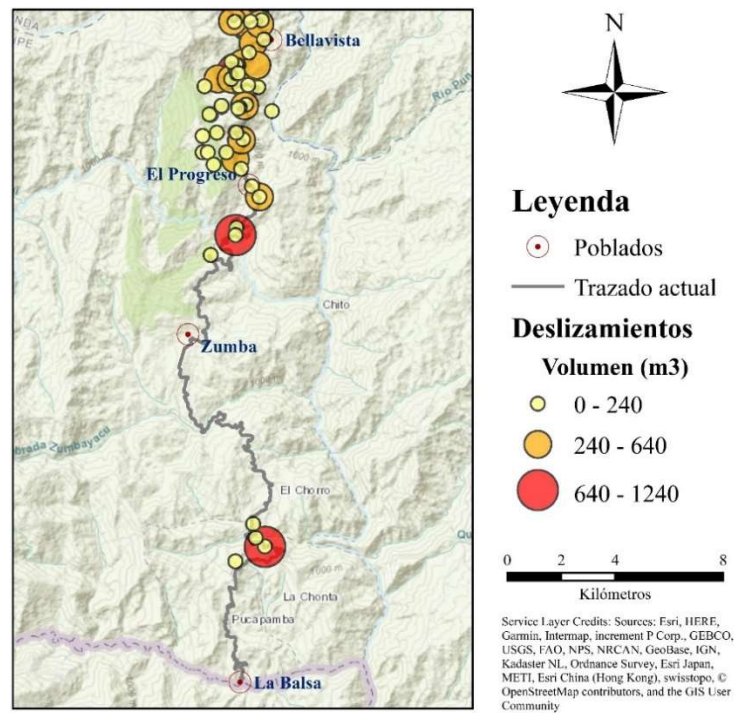


Figura 57. Eventos históricos MTOP. Fuente: elaboración propia

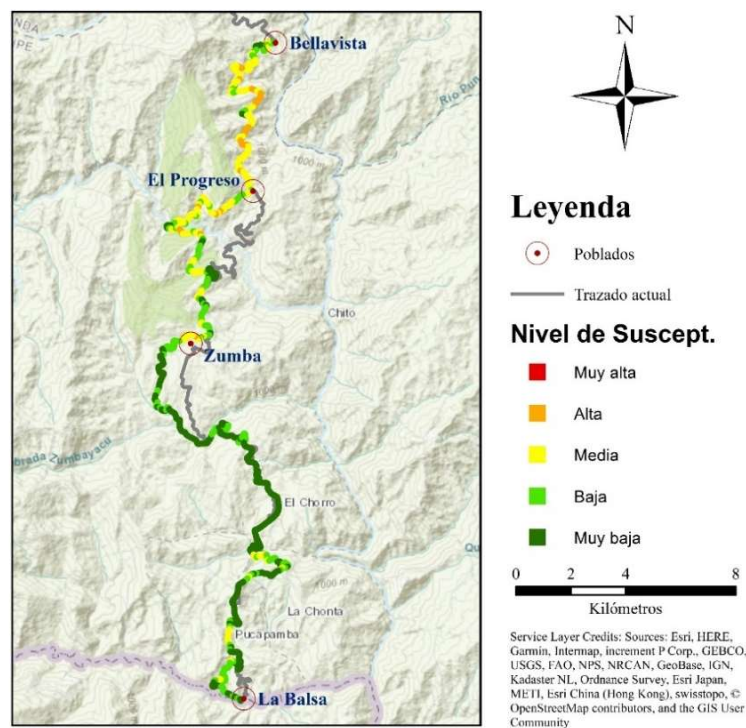


Figura 58. Modelo de susceptibilidad para precipitaciones actuales y periodo de retorno de 50 años. Fuente: elaboración propia

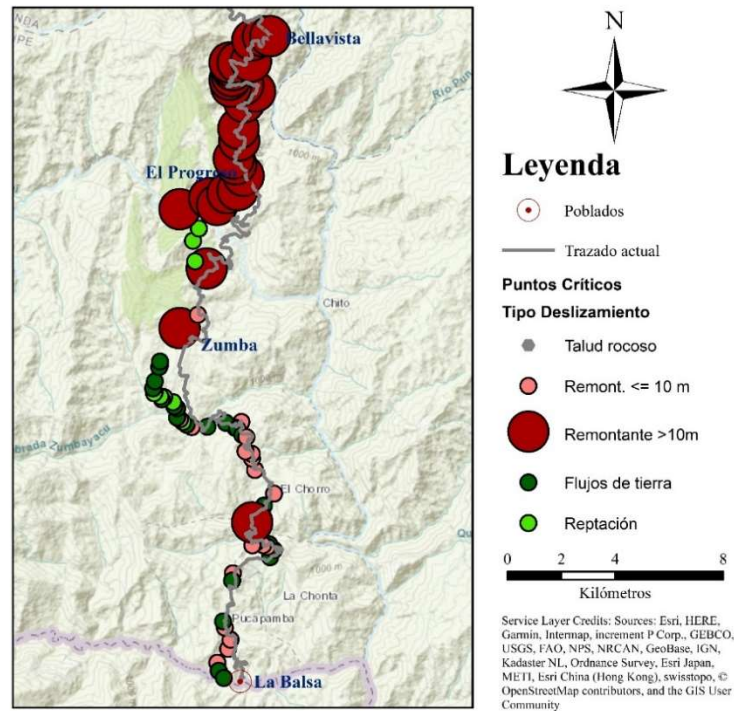


Figura 59. Puntos críticos identificados mediante interpretación de fotografías aéreas. Fuente: elaboración propia

4.2.3 Costos directos de remoción de escombros para la situación sin obras de mitigación

Los costos directos para la situación sin obras de mitigación se evalúan con base en los volúmenes de suelo inestable o que hace parte del deslizamiento. Esta valoración se lleva a cabo teniendo en cuenta los equipos, maquinaria, herramientas y mano de obra requerida para retirar los volúmenes de tierra deslizados. Para el efecto se analiza un precio unitario correspondiente a la actividad de remoción y retiro de escombros con unidad de metros cúbicos de tierra removida. Estos costos se obtienen a partir de datos empíricos del MTOP así como también de proyectos anteriores realizados. La Tabla 12 resume la valoración unitaria para estimar estos costos directos de procesos erosivos. Con base en este valor unitario, se estimará el volumen total de materia deslizado con base en la precipitación de cada escenario de lluvia contemplado y se procederá así a valorar el costo correspondiente en cada caso.

Tabla 12. Costos unitarios para retiro de escombros por metro cúbico.

ITEM	UNID AD	CANTIDA D	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Valla (3.8 x 1.8)	pza	0.0	\$ 173.49	\$ 0.17
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 39.76	\$ 0.40
Cerramiento	m	1.0	\$ 4.04	\$ 4.04
Movilidad para la inspección	km	0.5	\$ 0.32	\$ 0.16
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m ³	1.0	\$ 1.46	\$ 1.46
Transporte de materiales de excavación	m ³ -km	25.0	\$ 0.18	\$ 4.50
COSTO TOTAL DE OBRA REMOCIÓN DE ESCOMBROS (100 M3)				\$ 110

4.2.4 Costos directos por pérdida de banca

En casos particulares los deslizamientos afectan la vía y se puede producir pérdida de banca. Esto ocurre particularmente en deslizamientos remontantes de gran tamaño atravesados por la vía. En estos casos los costos directos serán los mencionados en el numeral anterior por remoción de escombros sumados a la reconstrucción de la vía en el tramo del deslizamiento. El costo unitario de vía se obtiene a partir del costo total de construcción de la vía indicado por el diseñador y el MTOP. El valor unitario de vía se estima por lo tanto en US\$ 2,000,000 por kilómetro (equivalente a US\$ 2,000 por metro lineal).

4.2.5 Costos indirectos por interrupción de tráfico

La evaluación de los costos indirectos incurridos por interrupciones de tráfico se fundamenta en el sobrecosto en el acarreo por hora adicional de transporte, considerando carga transportada promedio y consumo de gasolina promedio del vehículo. Este tipo de metodología de valoración económica de los tiempos de interrupción ha sido ampliamente utilizado en referencias internacionales de análisis de tráfico como Granas et al (2017), Goodwing (2004) y el NCHRP (2001). Asimismo, debido a que la ruta en estudio es una vía secundaria de bajo tránsito y con baja participación en el transporte de carga comercial a nivel nacional, contrario a la vía aledaña Loja - Macará (CAN, 2015), no se consideran sobre costos adicionales según el tipo de mercancía transportada.

Primero, se estiman los tiempos totales requeridos para retirar los volúmenes de tierra deslizada en los puntos críticos definidos. Para esto, se estimó el rendimiento unitario requerido para remover un metro cúbico de tierra (Tabla 13).

Tabla 13. Rendimientos de remoción de tierras por metro cúbico.

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	RENDIMIENTO (h)	DURACIÓN (h)
Preliminares				
Valla (3.8 x 1.8)	pza	0.0	4.00	0.00
Señales verticales sencillas	pza	0.0	2.00	0.02
Cerramiento	m	1.0	0.00	0.00
Movilidad para la inspección	km	0.5	0.00	0.00
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m ³	1.0	0.01	0.01
DURACIÓN TOTAL DE OBRA				
DURACIÓN DE REMOCIÓN DE ESCOMBROS (M3)				0.04

Adicionalmente, se utilizaron las proyecciones de tráfico originales del proyecto de construcción para obtener el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) estimado de la ruta, considerando el tráfico atraído por la obra del tramo en análisis, así como el tráfico ya atraído por las intervenciones y mantenimientos de los años recientes, ya ejecutados al primer tramo del colector Loja – La balsa (ruta E682)

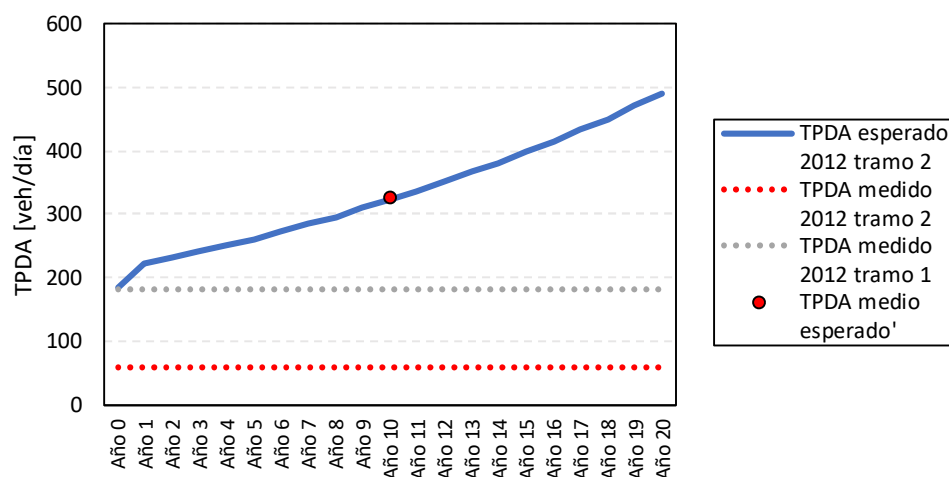


Figura 60. Proyecciones de tráfico de la ruta.

A su vez, las proyecciones de tráfico también permitieron desagregar la distribución porcentual de los tipos de vehículos que se espera utilicen la vía. Según esta información es posible estimar el tráfico horario de la ruta y la distribución por tipo de vehículos. Por otra parte, se utilizaron las tarifas comerciales medias utilizadas por los transportadores por km y carga en la ruta y/o rutas similares para estimar el sobre costo generado por la interrupción de

tráfico de los vehículos (Montenegro, 2015). La Tabla 14 resume los costos estimados por hora de interrupción del tráfico para diferentes tipos de vehículos y el valor ponderado total de costo por hora considerando la tasa promedio de tránsito de cada tipo vehicular.

Tabla 14. Costo medio de tráfico de la ruta. Fuente: (Montenegro, 2015)

Item	TPDA rel [%]	TPHA [Veh/h]	Carga estimada [Ton]	Costos transporte Ecuador [US\$/h/Veh]	Costos transporte Ecuador [US\$/h]
Automóvil y Jeep	18%	3			
Camioneta y Furgoneta	44%	7	4	\$ 20.41	\$ 132.70
Bus Grande	25%	4	7	\$ 40.60	\$ 148.86
Camión 2 ejes (pequeño)	7%	1	5	\$ 24.20	\$ 25.54
Camión 2 ejes (Mediano)	6%	1	9	\$ 42.48	\$ 37.76
Camión 3 ejes	0%	0	17	\$ 119.62	\$ -
Tasa ponderada vía [US\$/h]					\$ 344.87

Finalmente, los costos totales indirectos por tráfico se calculan a partir del tiempo requerido para remover los volúmenes de tierra deslizados y costo del tráfico horario acumulado durante la interrupción.

4.3 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR LLUVIAS INTENSAS – SIN OBRAS DE MITIGACIÓN

4.3.1 Riesgo en términos de volumen de suelo inestable o deslizado

La evaluación del riesgo se lleva a cabo inicialmente para la situación de cada uno de los trazados sin la implementación de las obras de mitigación. Para el efecto se integran los modelos de amenaza y vulnerabilidad descritos anteriormente, lo que permite obtener la distribución de volumen deslizado esperado anual para la vía. Los resultados de este proceso se presentan en la Figura 61 para la información histórica de precipitaciones (caso llamado “actual”) y para las condiciones con diferentes escenarios de cambio climático. Los resultados se presentan para los dos trazados propuestos analizados, el del 2012 y el del 2019.

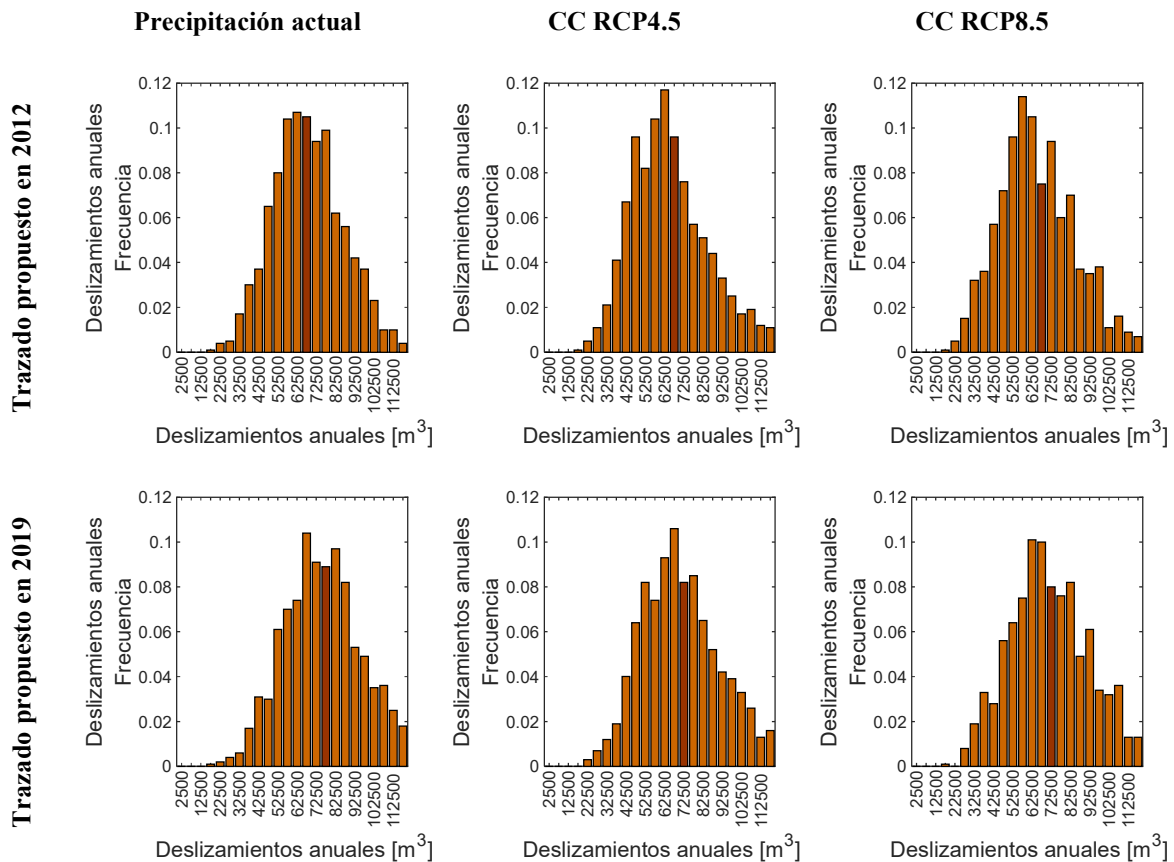


Figura 61. Histograma de volumen esperado de tierra deslizado anual

Los valores esperados de las distribuciones anteriores se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Valor esperado de volumen deslizado

Trazado Propuesto en	Valor esperado de deslizamientos m³		
	Precipitación Actual	Cambio Climático RCP4.5	Cambio Climático RCP 8.5
2012	65,416	65,888	66,012
2019	72,600	73,676	73,676

Los resultados anteriores se presentan gráficamente en el Figura 62 mostrando el volumen deslizado esperado anual en cada uno de los puntos críticos.

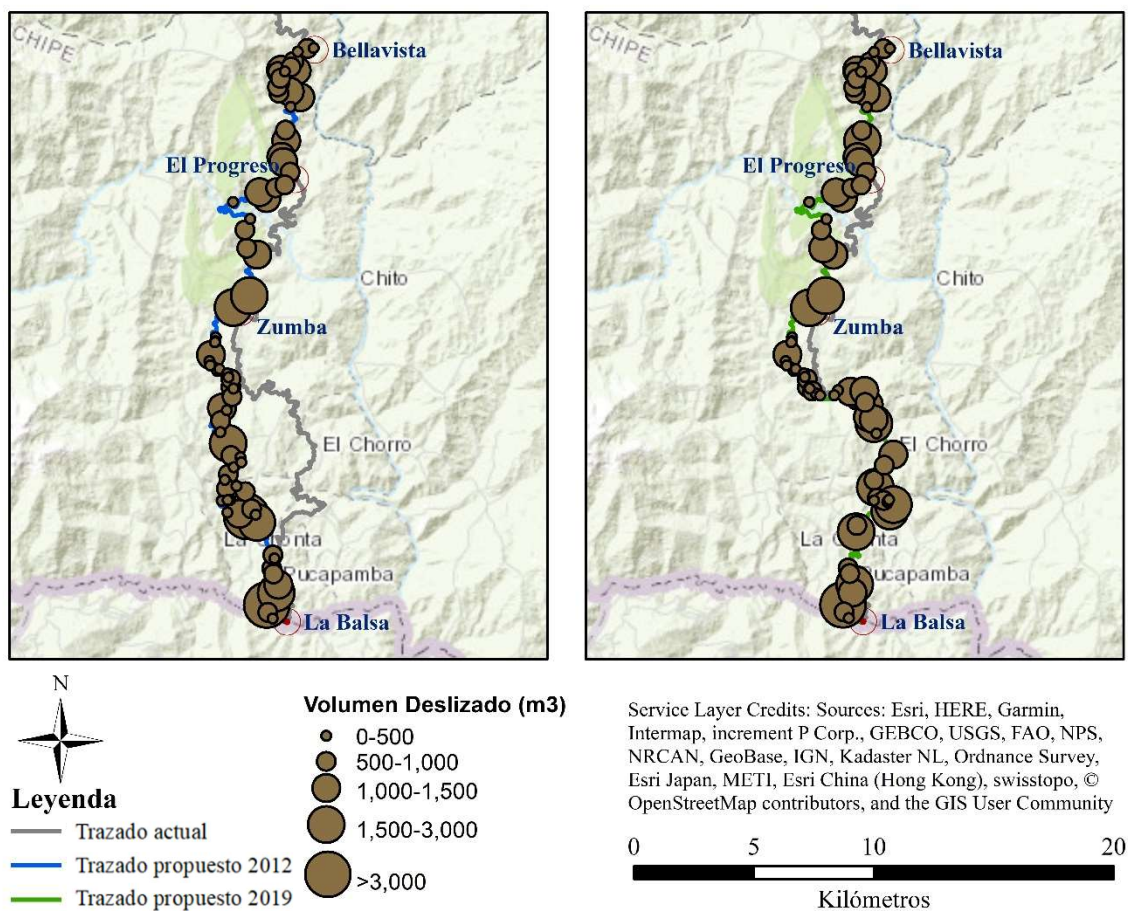


Figura 62. Volumen deslizado esperado anual. Fuente: elaboración propia

4.3.2 Riesgo en términos de tiempo de interrupción de la vía

A partir de los volúmenes deslizados esperados es posible evaluar los tiempos de interrupción del servicio de la vía. Estos tiempos sirven como base para establecer el costo indirecto de interrupción del servicio. En la Figura 63 se presentan los resultados obtenidos de tiempos de interrupción del servicio para los trazados propuestos en 2012 y 2019.

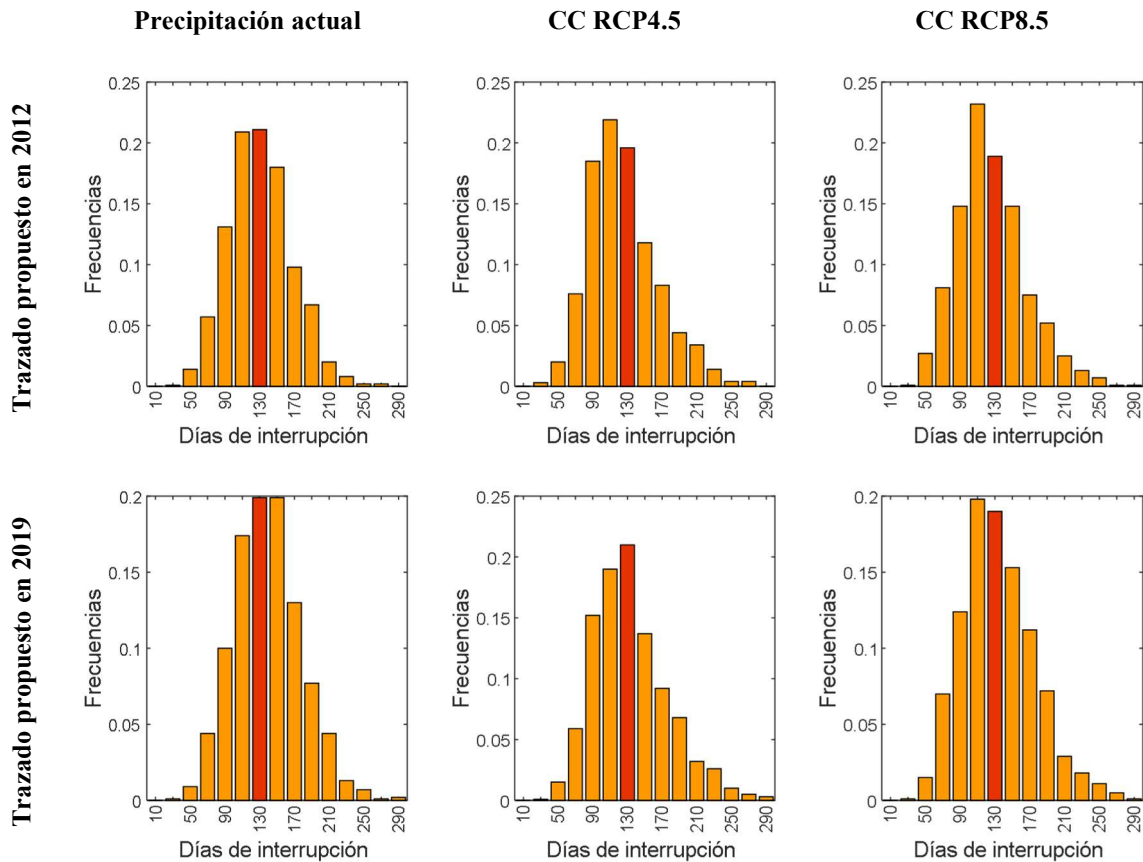


Figura 63. Histograma de días de interrupción del servicio

Los valores esperados de las distribuciones anteriores se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Valor esperado de tiempo de interrupción del servicio por deslizamientos

Trazado propuesto en	Valor esperado de días de interrupción del servicio m ³		
	Precipitación Actual	Cambio Climático RCP4.5	Cambio Climático RCP 8.5
2012	130	135	135
2019	140	143	144

4.3.3 Riesgo en términos de costos de recuperación de la vía

El riesgo actual de la vía también se evalúa en términos de costos económicos directos e indirectos según lo explicado en numeral 4.1. En las Figura 64 y Figura 65 se presentan los costos asociados a las diferentes condiciones de análisis anteriores. Como se indicó anteriormente, los costos directos incluyen los costos asociados a remoción de escombros y pérdida de banca, los indirectos están asociados al tiempo de interrupción de la vía y los totales equivalen a la suma de los directos y los indirectos.

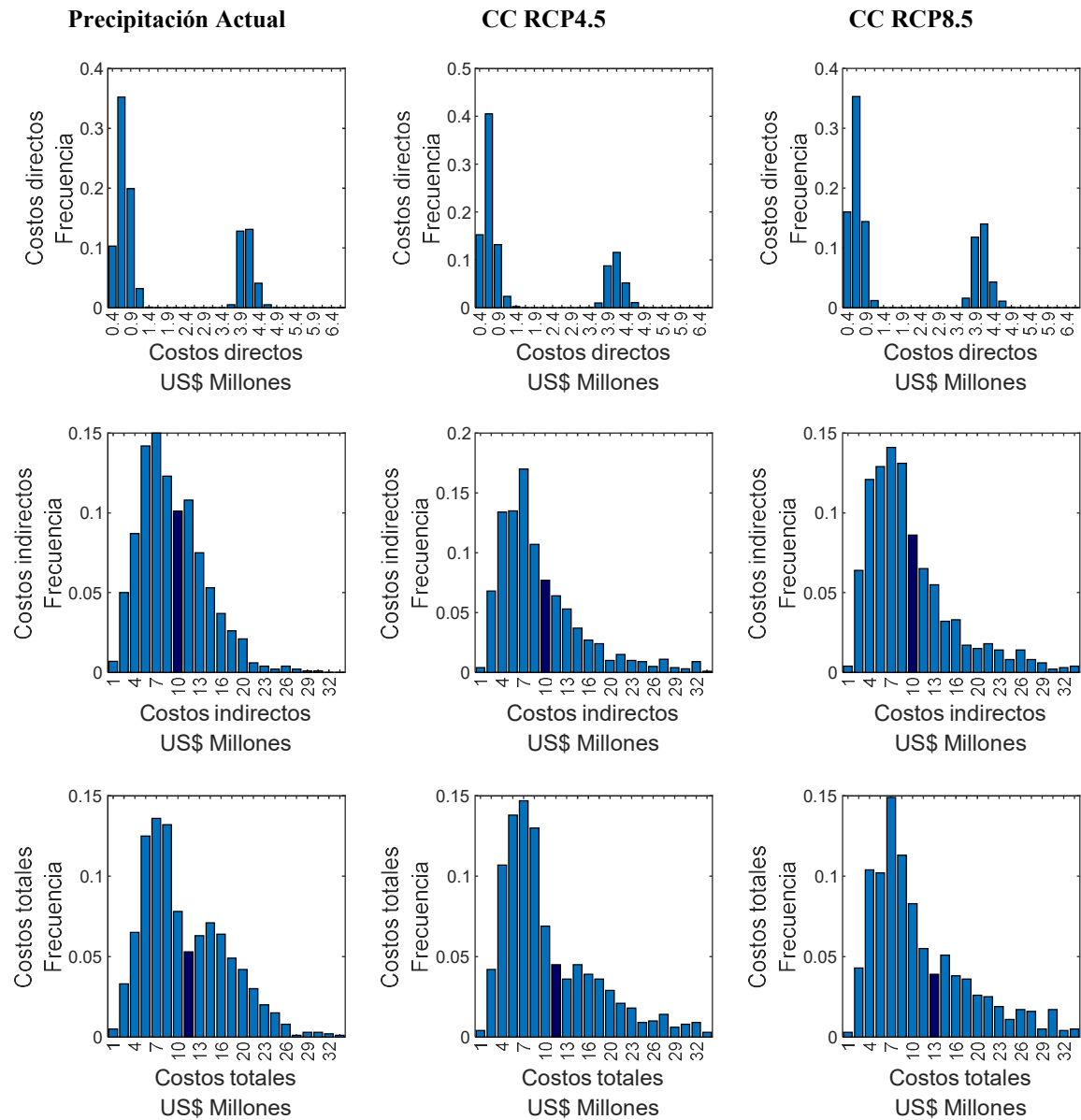


Figura 64. Costos directos esperados por eventual remoción de escombros e indirectos por interrupción del servicio para el trazado propuesto en 2012

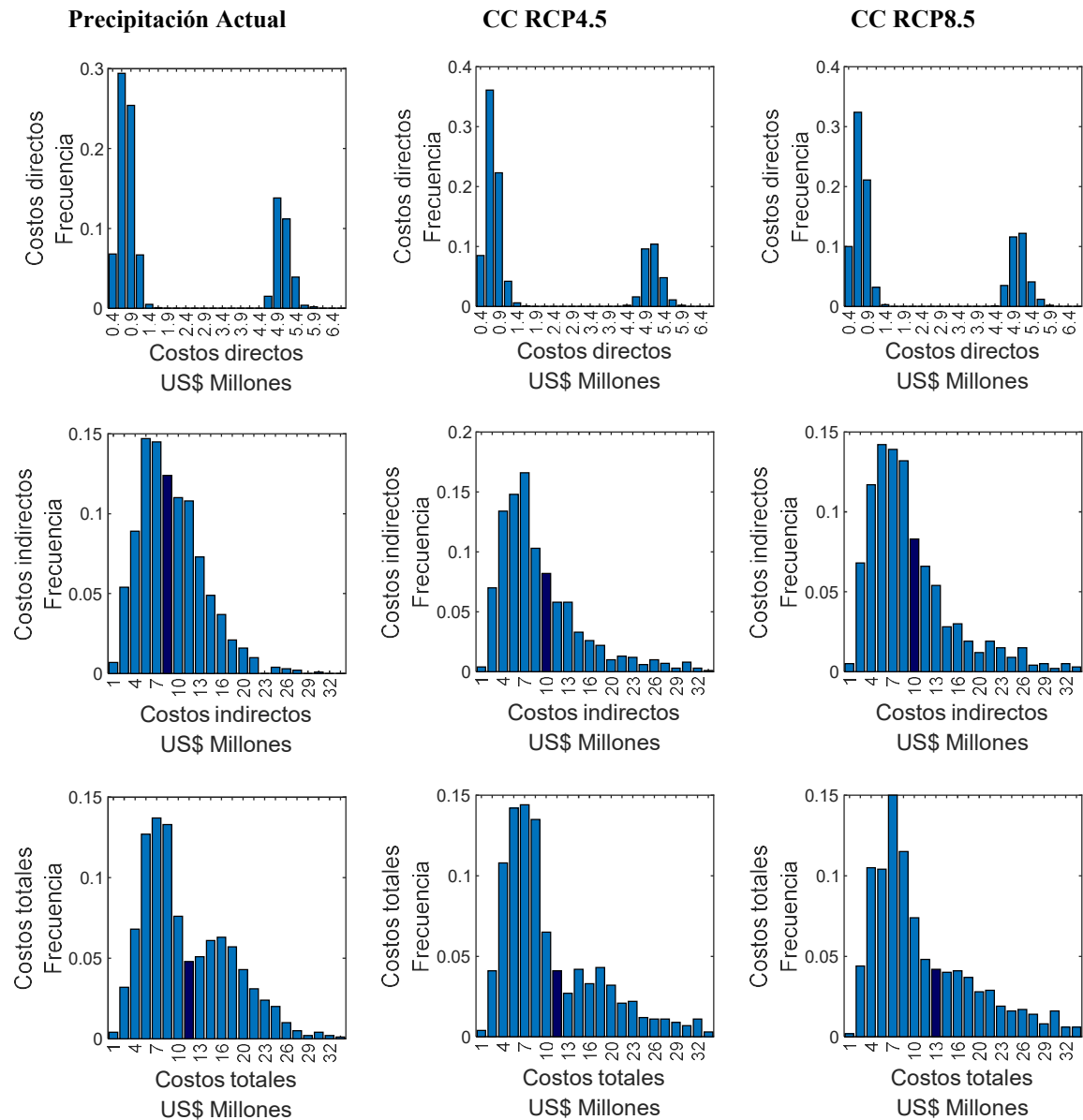


Figura 65. Costos directos esperados por eventual remoción de escombros e indirectos por interrupción del servicio para el trazado propuesto en 2019

Adicionalmente, en la Tabla 17 se resumen los valores medios anuales para los diferentes casos analizados.

Tabla 17. Valores esperados de costos directos e indirectos para la vía actual

Trazado propuesto en	Tipo precipitación	Valor esperado de costos anuales directos remoción	Valor esperado de costos anuales directos banca	Valor esperado de costos anuales indirectos	Valor esperado de costos anuales totales
		(US\$ Millones)	(US\$ Millones)	(US\$ Millones)	(US\$ Millones)
2012	Actual	0.76	0.97	9.4	11.13
	CC1	0.73	0.88	10.22	11.83
	CC2	0.73	1.03	10.77	12.53
2019	Actual	0.84	1.25	9.22	11.31
	CC1	0.81	1.12	10.02	11.95
	CC2	0.81	1.32	10.55	12.68

Finalmente, en la Figura 66 se presenta la pérdida máxima probable para diferentes periodos de retorno correspondientes a la situación sin obras de mitigación.

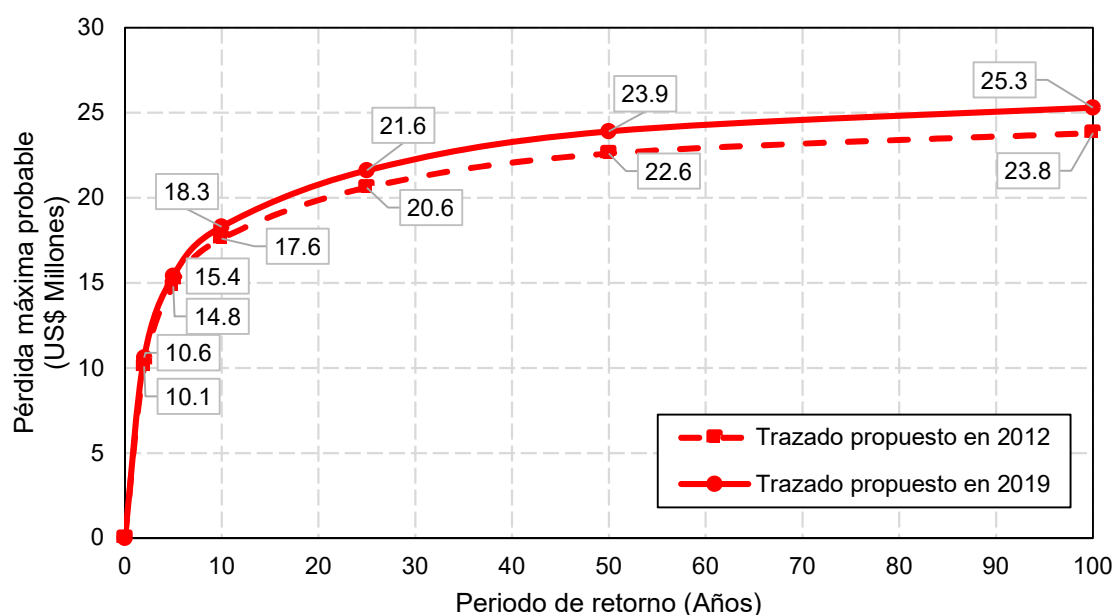


Figura 66. Pérdida máxima probable escenario actual

4.3.4 Validación de costos según información del MTOP

Para la validación de estos valores se verifican los eventos históricos registrados por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, MTOP. El catálogo de deslizamientos realizado por el MTOP incluye los datos del 2016 hasta mitad del 2019 para el tramo de Vilcabamba hasta La Balsa. A partir de estos datos, el MTOP obtuvo una cifra de mantenimiento anual por kilómetro de vía. La comparación de este valor medio con los valores medios obtenidos

en los modelos se presenta en la Tabla 18. Como resultado de esta verificación, se puede concluir que los valores calculados en este estudio se consideran válidos.

Tabla 18. Comparación de costos modelados con valores registrados por MTOP

	Precipitaciones Actuales
	(US\$/km)
Trazado propuesto en 2012	14,615
Trazado propuesto en 2019	16,153
MTOP	13,588

4.4 MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

4.4.1 Tipos de medidas de mitigación

Las medidas de mitigación del riesgo se pueden dividir en medidas estructurales y medidas no estructurales. Las medidas estructurales corresponden principalmente a obras de intervención cuyo fin principal es la de reducir el riesgo mediante la realización de obras nuevas o el reforzamiento de infraestructura existente que permitan la estabilización de zonas potencialmente inestables o la protección de la carretera en caso de una descarga torrencial en alguno de los ríos o quebradas que atraviesan la vía.

Para el caso riesgo sísmico, las medidas consistirían en el reforzamiento de puentes, túneles, alcantarillas, muros, pantallas o cualquier tipo de obra existente en la vía. Para el caso de inestabilidad del terreno las posibles opciones consideran obras de construcción grises (las que involucran principalmente concreto en la intervención) y obras de construcción verdes (las que adoptan materiales naturales para lograr la estabilización). Estas incluyen estructuras de contención o estabilización, conformación de taludes y obras de drenaje y similares. Finalmente, para el caso de eventos de inundación o descargas torrenciales usualmente las obras consisten en estructuras de protección, reconfiguración hidráulica de los cauces, mejoramiento en las condiciones de flujo y drenaje y la realización de obras tales como alcantarillas y/o puentes. Dentro de las medidas no estructurales se encuentran los sistemas de alerta temprana (SAT), la designación de rutas alternas o “bypasses” y las medidas de reacción, prevención y atención de emergencias, entre otros. Las diferentes medidas de mitigación en el sector vial se resumen en la Figura 67.

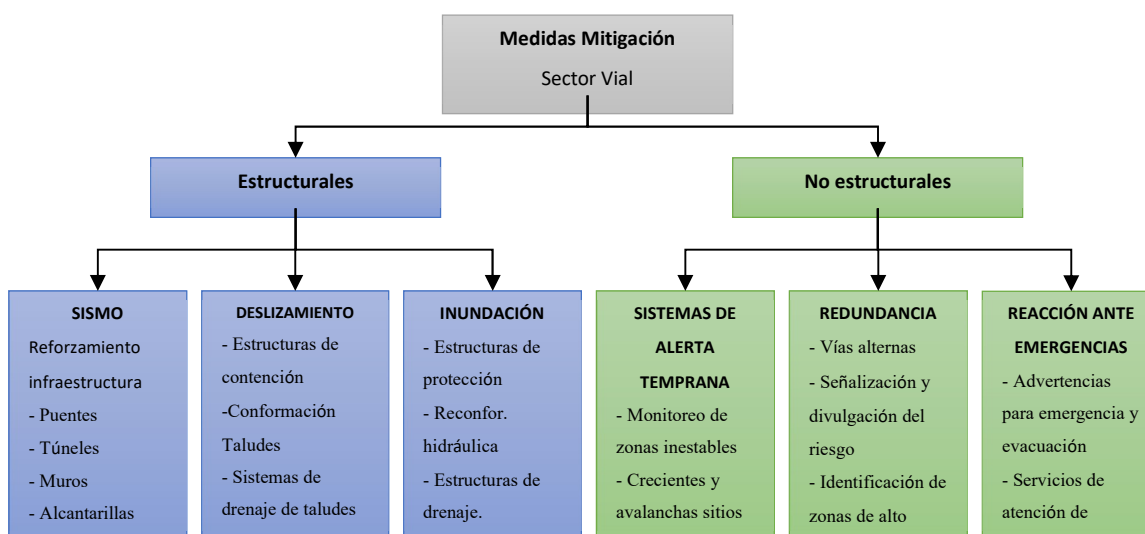


Figura 67. Medidas de mitigación en proyectos viales

Las medidas estructurales se dividen a su vez en medidas verdes y grises. Dentro de las medidas estructurales verdes, que por otro lado buscan minimizar el impacto ambiental y paisajístico, se encuentran la estabilización de taludes por terraceo y siembra de especies estabilizantes, muros en gaviones o tierra armada, estabilización con elementos de madera, guadua o piedras de gran tamaño. Dentro de la categoría de medidas estructurales grises que presentan en general mayor durabilidad e impacto, están los muros de contención en concreto reforzado en voladizo o con anclajes, los muros en concreto ciclópeo y obras como pasos elevados, puentes o alcantarillas en concreto. Algunas de las características principales de las medidas verdes y grises se resumen en la Tabla 19.

Tabla 19. Caracterización medidas grises y verdes

MEDIDAS VERDES DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES	MEDIDAS GRISES DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES
<u>Condiciones:</u> <ul style="list-style-type: none"> Menor impacto medio ambiental Menor impacto paisajístico Uso de materiales y mano de obra de la región Menores costos de construcción <u>Limitaciones:</u> <ul style="list-style-type: none"> Menor confiabilidad a largo plazo Mayores costos de mantenimiento No aplicables en casos críticos	<u>Condiciones:</u> <ul style="list-style-type: none"> Mayor durabilidad Menores costos de mantenimiento Aplicables en casos de taludes críticos Mayor confiabilidad en el largo plazo <u>Limitaciones:</u> <ul style="list-style-type: none"> Mayores costos de inversión inicial Mano de obra y maquinaria especializada Mayor impacto ambiental y paisajístico

4.4.2 Medidas verdes de mitigación

A continuación, se presentan las diferentes medidas de estabilización de taludes identificadas. Estas se presentan mediante fichas de caracterización en las cuales se indica el alcance y las limitaciones de cada una, así como también unos esquemas particulares y unas fotografías ilustrativas.

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL

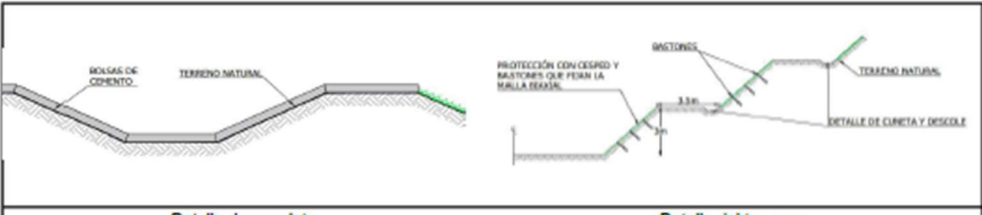

Cunetas protegidas mediante bolsas de cemento	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es prevenir el deslizamiento de taludes que puedan afectar la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: <ul style="list-style-type: none"> • Terraceos con alturas de 3 (4.5) m y bermas de 3.50 (2.5) m, taludes 1:1/2 y protección con biomantos o empedrado con cespiones soportados con malla biaxial fijada por bastones. • Cunetas en las bermas con descoles, y protección mediante bolsas de suelo cemento.
Aplicabilidad	Aplicable a deslizamientos complejos de tipo remontante de altura menor o igual a 10m en suelos residuales de rocas graníticas.
Requerimientos	Se requiere que esta medida sea sustentada con un análisis de estabilidad para garantizar que el material deslizante sea removido para posteriormente realizar la protección.
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es de alrededor de US\$ 700 por metro lineal
Esquemas de la intervención	
	
Detalle de canaleta	Detalle del terraceo
Fotografía Ilustrativa	
	
Disposición de cortacorrientes	Terraceo empedrado con cespiones

Figura 68. Conformación del talud y restitución de la capa vegetal. Fuente: elaboración propia

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL

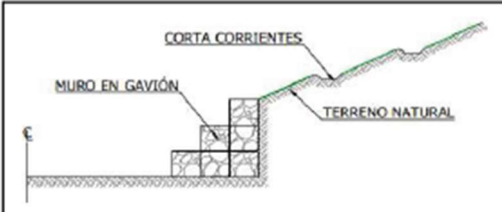
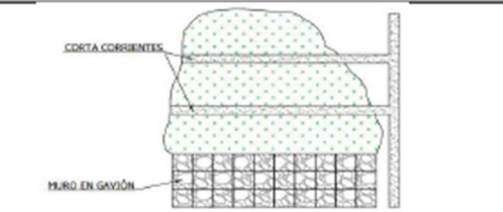


Muros de contención y obras de drenaje	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es prevenir el deslizamiento de taludes que puedan afectar la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: <ul style="list-style-type: none"> • Muros de contención con concreto reforzado o en gaviones • Obras de drenaje y recuperación de capa vegetal acompañada con recuperación morfológica adecuandola con cortacorrientes
Aplicabilidad	Aplicable a zonas de reptación debido a que la masa deslizante es relativamente pequeña para zonas de esquistos y rocas sedimentarias.
Requerimientos	Se requiere revestir los cortacorrientes para protegerlos de la erosión, y verificar que los canales que recolectan el agua de los cortacorrientes tengan una pendiente tal que impida la sedimentación de materiales.
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es alrededor de US\$ 1,055 por metro lineal
Esquemas de la intervención	
 <p>Vista lateral del sistema</p>	 <p>Vista en planta del sistema</p>
Fotografía Ilustrativa	
 <p>Disposición de cortacorrientes</p>	 <p>Disposición de muro</p>

Figura 69. Muro en gaviones y drenajes horizontales. Fuente: elaboración propia

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL

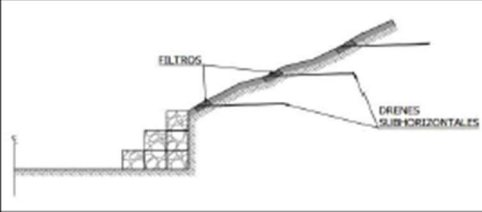
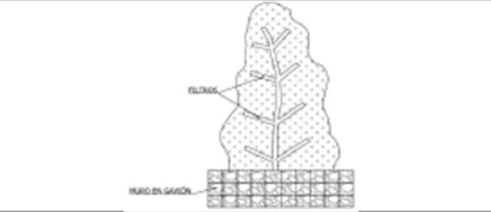


Muros en gaviones y drenes en espina de pescado	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es solucionar y prevenir el deslizamiento de taludes que puedan afectar la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: <ul style="list-style-type: none"> • Muros de contención en gaviones para protección de la base • Obras de drenaje en espina de pescado que permitan la rápida evacuación del agua, reforzadas con drenajes subhorizontales
Aplicabilidad	Aplicable a zonas de reptación donde existan manifestaciones de flujos de tierra, y en suelos residuales.
Requerimientos	Se requiere que se construyan cajas de concreto en la punta de los drenes horizontales para su protección. El agua subterránea recogida se debe extender al exterior de la masa deslizante o hacia un área no afectada por la inestabilidad de la pendiente.
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es alrededor de US\$ 1,340 por metro lineal
Esquemas de la intervención	
 <p>Vista lateral del sistema</p>	 <p>Vista en planta del sistema</p>
Fotografía Ilustrativa	
 <p>Proceso constructivo</p>	 <p>Disposición del sistema</p>

Figura 70. Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado. Fuente: elaboración propia

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL

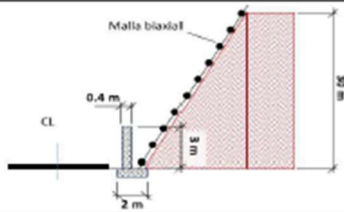

Control de escombros en taludes rocosos	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es controlar la caída de escombros producida por deslizamientos de taludes que puedan ocurrir en la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: <ul style="list-style-type: none"> • Malla biaxial de acero • Muro de contención en voladizo
Aplicabilidad	Aplicable en zonas de inestabilidad en taludes rocosos.
Requerimientos	Se debe garantizar un contacto continuo con el terreno por lo que se deben poner grapas adicionales dónde se requiera. Antes de extender la red hacia abajo es necesario remover las rocas más inestables.
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es alrededor de US\$ 818 por metro lineal
Esquemas de la intervención	
 <p style="text-align: center;">Esquema del sistema de protección</p>	
Fotografía Ilustrativa	
 <p style="text-align: center;">Disposición del sistema</p>	

Figura 71. Muro control escombros y malla biaxial. Fuente: elaboración propia

4.4.3 Medidas grises de mitigación

A continuación, se presentan las diferentes medidas de estabilización de taludes identificadas. Estas se presentan mediante fichas de caracterización en las cuales se indica el alcance y las limitaciones de cada una, así como también unos esquemas particulares y unas fotografías ilustrativas.

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL




Protección con malla reforzada y concreto lanzado	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es prevenir el deslizamiento de taludes que puedan afectar la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: <ul style="list-style-type: none"> • Malla reforzada y concreto lanzado desde el inicio del corte • Torones de anclaje • Sistemas de drenaje (drenes horizontales y lloraderos)
Aplicabilidad	Aplicable a deslizamientos complejos de tipo remontante de altura mayor a 20 m en suelos residuales de rocas graníticas, y deslizamientos superficiales ya establecidos.
Requerimientos	Se requiere que el diseño defina la geometría del talud contemplando la altura de terrazas y bermas.
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es de alrededor de US\$ 9,577 por metro lineal
Esquemas de la intervención	
 <p align="center">Esquema del sistema de protección</p>	
Fotografía Ilustrativa	
 <p align="center">Proceso constructivo</p>	 <p align="center">Disposición del sistema</p>

Figura 72. Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados. Fuente: elaboración propia

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL



Túneles falsos	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es prevenir el deslizamiento de taludes que puedan afectar la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: • Túneles falsos que permitan que el material deslizado no obstruya la banca y se alcance un ángulo de reposo a partir de la clave del túnel.
Aplicabilidad	Aplicable a principalmente a deslizamientos complejos de tipo remontante de altura mayor a 30 m.
Requerimientos	Se requiere de un sistema fuerte de sostenimiento que soporte las cargas del material que cubre el túnel, y que absorba el impacto generado por posibles desprendimientos de material
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es alrededor de US\$ 3,740 por metro lineal
Esquemas de la intervención	
	
Situación actual	Solución propuesta
Fotografía Ilustrativa	
	
Proceso constructivo	Túnel falso con material deslizado encima

Figura 73. Túnel falso – Viaducto. Fuente: elaboración propia

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL

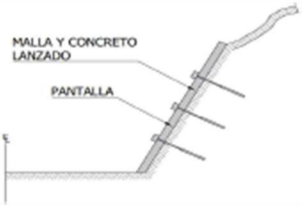


Taludes en Roca	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es prevenir el deslizamiento de taludes que puedan afectar la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: <ul style="list-style-type: none"> • Pantallas, y posible complementación con malla y concreto lanzado en el frente inestable • Cables de anclaje • Sistemas de drenaje
Aplicabilidad	Aplicable en zonas de inestabilidad en taludes rocosos.
Requerimientos	En pendientes con filtraciones, se requieren orificios de drenaje por detrás del área del hormigón proyectado para aliviar las posibles presiones hidroestáticas en el trasdós de la pantalla de concreto lanzado.
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es alrededor de US\$ 5,742 por metro lineal
Esquemas de la intervención	
 <p align="center">Esquema del sistema de protección</p>	
Fotografía Ilustrativa	
 <p align="center">Proceso constructivo</p>	 <p align="center">Disposición del sistema</p>

Figura 74. Muro de concreto lanzado con pernos de anclaje. Fuente: elaboración propia

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL

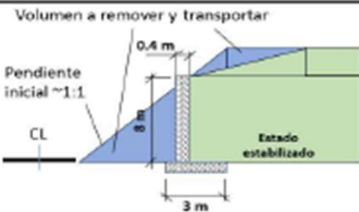


Muros de contención en voladizo	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es prevenir el deslizamiento de taludes que puedan afectar la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: <ul style="list-style-type: none"> • Malla biaxial de acero • Muro de contención en voladizo
Aplicabilidad	Aplicable a deslizamientos complejos de tipo remontante de altura menor o igual a 10m en suelos residuales de rocas graníticas.
Requerimientos	Se requiere un sistema de drenaje y subdrenaje completo. Su diseño debe regirse por un análisis de estabilidad de taludes y de estabilidad intrínseca del muro. Es recomendable colocar llaves de cortante por debajo del muro.
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es de alrededor de US\$ 1,543 por metro lineal
Esquemas de la intervención	
 <p>Volumen a remover y transportar</p> <p>Pendiente inicial ~1:1</p> <p>CL</p> <p>0.4 m</p> <p>3 m</p> <p>Estado estabilizado</p> <p>Esquema del sistema de intervención</p>	
Fotografía Ilustrativa	
 <p>Proceso constructivo</p>	 <p>Disposición del sistema</p>

Figura 75. Muro de contención gravitacional. Fuente: elaboración propia

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL

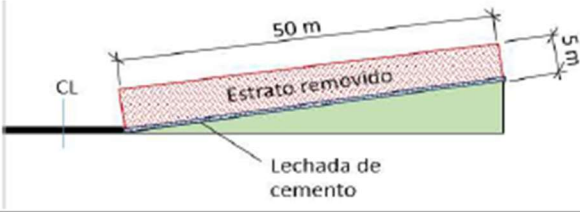


Remoción de estratos deslizantes y estabilización con concreto	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es solucionar y prevenir el deslizamiento de taludes que puedan afectar la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: <ul style="list-style-type: none"> • Remoción de estratos reptantes • Lechada de cemento sobre superficie del nuevo estrato
Aplicabilidad	Aplicable a zonas de reptación donde existan manifestaciones de flujos de tierra, y en suelos residuales.
Requerimientos	Se requiere que esta medida sea sustentada con un análisis de estabilidad para garantizar que el material deslizante sea removido para posteriormente realizar la protección.
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es alrededor de US\$ 2,708 por metro lineal
Esquemas de la intervención	
 <p style="text-align: center;">Esquema del sistema de intervención</p>	
Fotografía Ilustrativa	
 <p style="text-align: center;">Disposición del sistema</p>	

Figura 76. Retiro de material y hormigón de limpieza. Fuente: elaboración propia

FORMATO DE TIPOS DE OBRAS DE INTERVENCIÓN PARA MITIGACIÓN DEL RIESGO VIAL

Mitigación de pérdida de banca	
Objetivos	El objetivo principal de esta intervención es prevenir el deslizamiento de taludes que puedan afectar la zona dónde planea ser construido el eje vial.
Descripción de la intervención	La intervención comprende la conformación de: <ul style="list-style-type: none"> Remoción de terreno inestable Muro en voladizo en zona de banca
Aplicabilidad	Aplicable a deslizamientos complejos de tipo remontante de altura menor o igual a 10m en suelos residuales de rocas graníticas.
Requerimientos	Se requiere un sistema de drenaje y subdrenaje completo. Su diseño debe regirse por un análisis de estabilidad de taludes y de estabilidad intrínseca del muro. Es recomendable colocar llaves de cortante por debajo del muro.
Presupuesto unitario estimado	El presupuesto estimado para esta intervención es de alrededor de US\$ 1,250 por metro lineal

Esquemas de la intervención
 <p style="text-align: center;">Esquema del sistema de intervención</p>


Fotografía Ilustrativa
 <p style="text-align: center;">Proceso constructivo</p>

Figura 77. Mitigación pérdida de banca. Fuente: elaboración propia

4.4.4 Valoración económica unitaria de las medidas

Para cada una de las medidas de estabilización se realizó un Análisis de Precios Unitarios (APU) con el objetivo de identificar el costo total de intervención en cada uno de los puntos críticos. En los siguientes capítulos se presenta el análisis de APU para cada medida de mitigación y al final un capítulo con los costos totales resumidos.

4.4.4.1 Conformación de talud y restitución de la capa vegetal

En la Figura 78 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 20 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

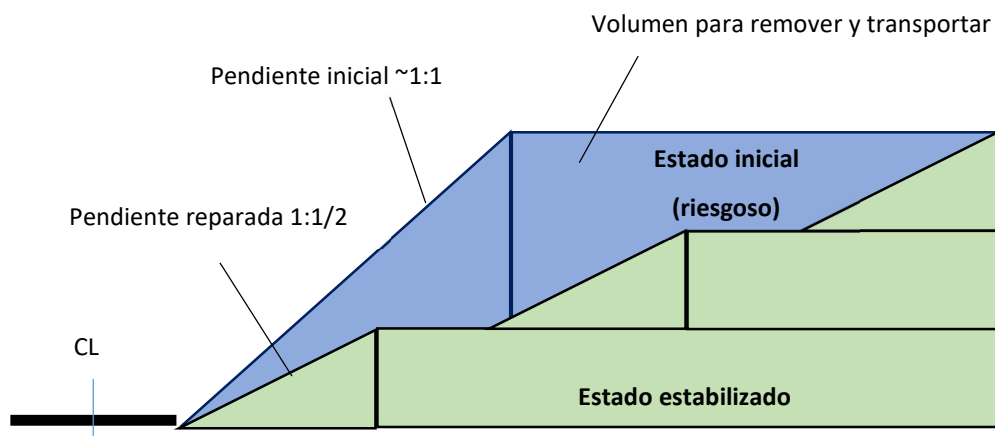


Figura 78. Esquema conformación de talud y restitución de la capa vegetal

Tabla 20. APU conformación de talud y restitución de la capa vegetal

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 40	\$ 0
Cerramiento	m	1.0	\$ 4	\$ 4
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m ³	60.1	\$ 1	\$ 88
Excavación y relleno para estructura	m ³	2.0	\$ 6	\$ 12
Transporte de materiales de excavación	m ³ -km	1,802.4	\$ 0	\$ 324
Materiales y estructuras				
Bolsas de suelo-cemento (50kg/m ³)	m ³	1.5	\$ 86	\$ 130
Área sembrada	m ²	24.4	\$ 1	\$ 24
Malla biaxial	m ²	24.4	\$ 5	\$ 117
COSTO TOTAL DE OBRA (POR METRO LINEAL)				\$ 699

4.4.4.2 Pantallas concreto con anclaje pre-esforzado

En la Figura 79 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 21 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

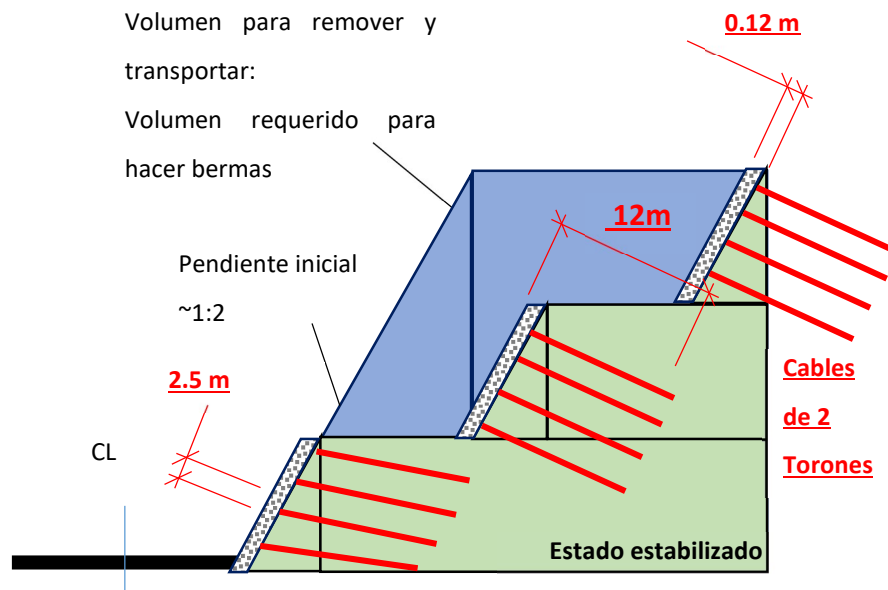


Figura 79. Esquema pantallas concreto con anclaje pre-esforzado

Tabla 21. APU pantallas concreto con anclaje pre-esforzado

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 40	\$ 0
Cerramiento	m	1.0	\$ 4	\$ 4
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m³	20.7	\$ 1	\$ 30
Excavación y relleno para estructura	m³	2.0	\$ 6	\$ 12
Transporte de materiales de excavación	m³-km	620.9	\$ 0	\$ 112
Materiales y estructuras				
Bolsas de suelo-cemento (50kg/m³)	m³	1.5	\$ 86	\$ 130
Hormigón proyectado e = 12 cm, incl. refuerzo	m²	61.8	\$ 52	\$ 3,201
Cables de anclaje activo L = 12 m para estabilización de taludes	pza	7.0	\$ 1,026	\$ 7,184
COSTO TOTAL DE OBRA (POR METRO LINEAL)				\$10,672

4.4.4.3 Túnel falso - viaducto

En la Figura 80 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 22 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

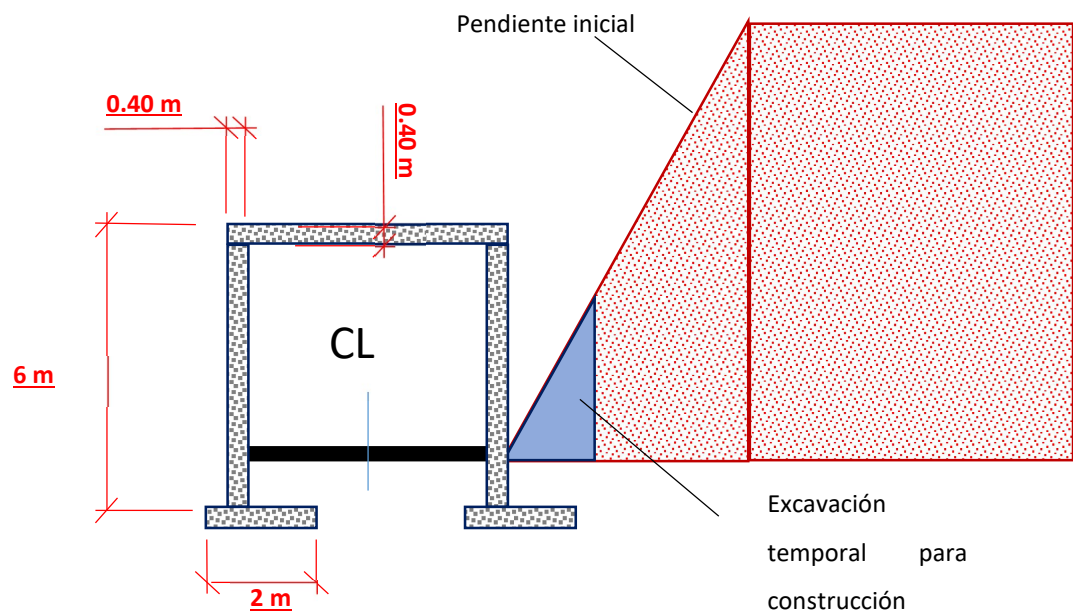


Figura 80. Esquema túnel falso - viaducto

Tabla 22. APU túnel falso - viaducto

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 40	\$ 0
Cerramiento	m	1.0	\$ 4	\$ 4
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m ³	8.0	\$ 1	\$ 12
Transporte de materiales de excavación	m ³ -km	240.0	\$ 0	\$ 43
Materiales y estructuras				
Construcción de losas de concreto reforzado e = 0.40 m	m ²	11.2	\$ 139	\$ 1,554
Construcción de pantallas de concreto reforzado e = 0.40 m	m ²	16.0	\$ 133	\$ 2,126
COSTO TOTAL DE OBRA (POR METRO LINEAL)				\$ 3,739

4.4.4.4 Muro en gaviones y drenajes horizontales

En la Figura 81 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 23 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

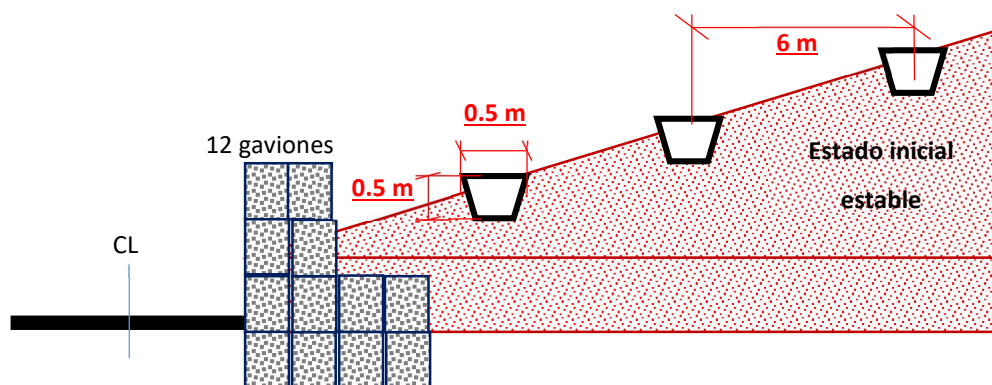


Figura 81. Esquema muro en gaviones y drenajes horizontales

Tabla 23. APU muro en gaviones y drenajes horizontales

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 40	\$ 0
Cerramiento	m	1.0	\$ 4	\$ 4
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m³	13.8	\$ 1	\$ 20
Transporte de materiales de excavación	m³-km	415.0	\$ 0	\$ 75
Materiales y estructuras				
Gaviones	m³	12.0	\$ 60	\$ 714
Área sembrada	m²	24.4	\$ 1	\$ 24
Bolsas de suelo-cemento (50kg/m³)	m³	2.5	\$ 86	\$ 216
COSTO TOTAL DE OBRA (POR METRO LINEAL)				\$ 1,054

4.4.4.5 Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado

En la Figura 82 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 24 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

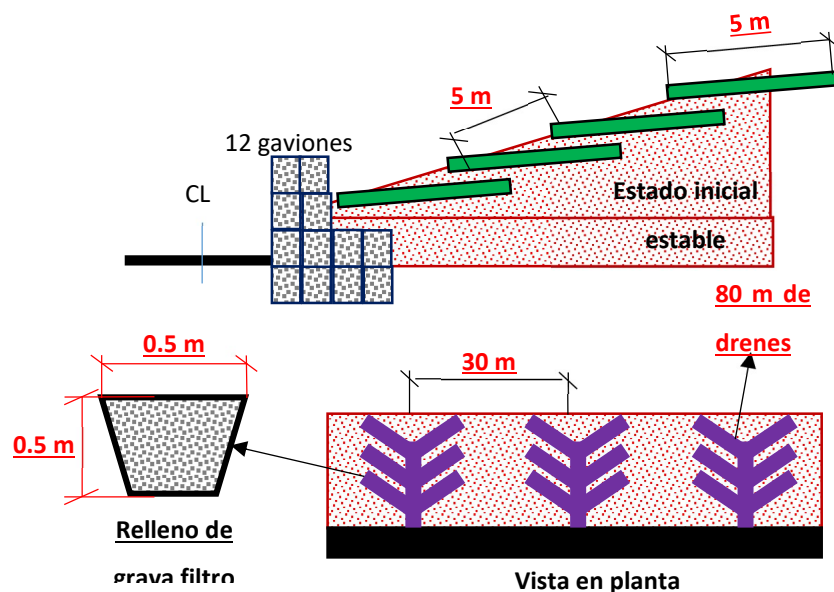


Figura 82. Esquema muro en gaviones y drenajes en espina de pescado

Tabla 24. APU muro en gaviones y drenajes en espina de pescado

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 40	\$ 0
Cerramiento	m	1.0	\$ 4	\$ 4
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m ³	13.8	\$ 1	\$ 20
Transporte de materiales de excavación	m ³ -km	414.0	\$ 0	\$ 75
Materiales y estructuras				
Gaviones	m ³	12.0	\$ 60	\$ 714
Geotextil	m ²	6.1	\$ 3	\$ 18
Material filtrante para drenes de pescado	m ³	0.8	\$ 17	\$ 13
Drenes subhorizontales en suelo	m	7.6	\$ 78	\$ 593
COSTO TOTAL DE OBRA (POR METRO LINEAL)				\$ 1,438

4.4.4.6 Pantalla de concreto con pernos de anclaje

En la Tabla 83 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 25 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

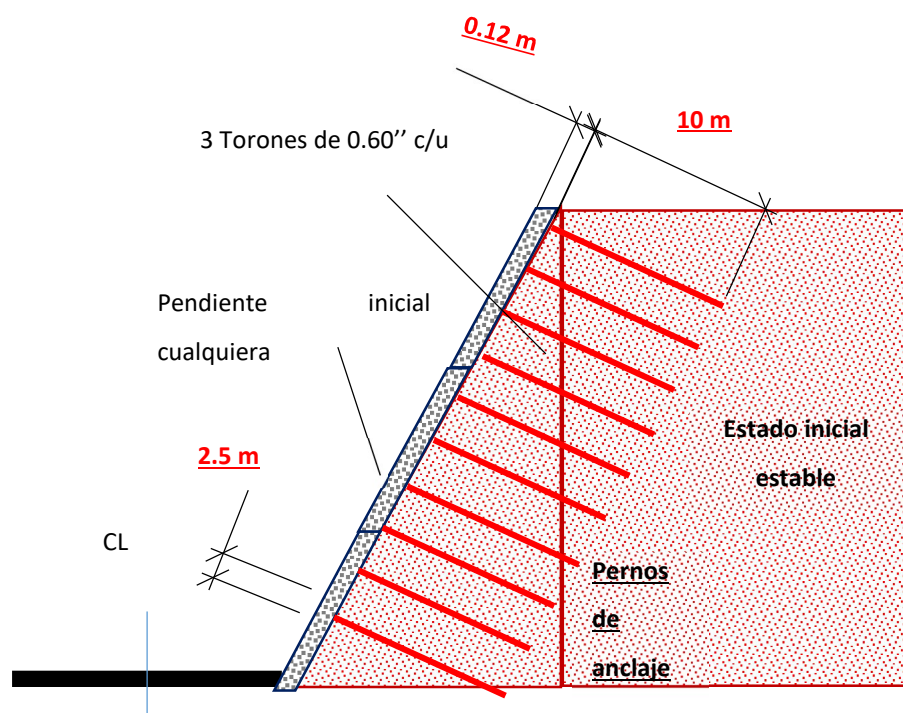


Figura 83. Esquema pantalla de concreto con pernos de anclaje

Tabla 25. APU para pantalla de concreto con pernos de anclaje

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 40	\$ 0
Cerramiento	m	1.0	\$ 4	\$ 4
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m ³	29.1	\$ 1	\$ 43
Transporte de materiales de excavación	m ³ -km	874.3	\$ 0	\$ 157
Materiales y estructuras				
Hormigón proyectado e = 12 cm, incl. refuerzo	m ²	30.9	\$ 52	\$ 1,601
Pernos de anclaje pasivos L = 7.5 m para estabilización de taludes en roca	pza	4.9	\$ 796	\$ 3,937
COSTO TOTAL DE OBRA (POR METRO LINEAL)				\$ 5,742

4.4.4.7 Muro control de escombros y malla biaxial

En la Figura 84 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 26 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

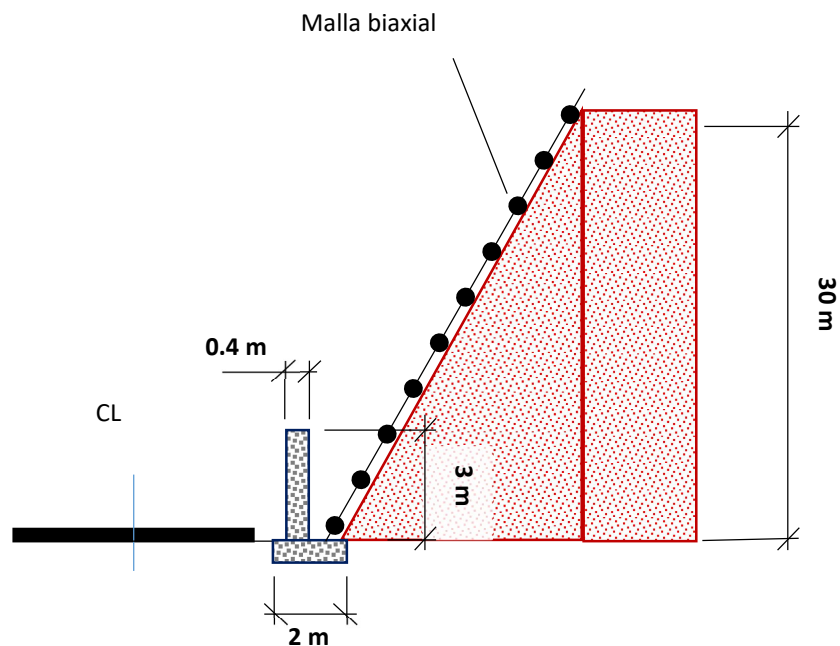


Figura 84. Esquema muro control de escombros y malla biaxial

Tabla 26. APU muro control de escombros y malla biaxial

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 39.76	\$ 0.40
Cerramiento	m	1.0	\$ 4.04	\$ 4.04
Materiales y estructuras				
Construcción de pantallas de concreto reforzado e = 0.40 m	m ²	5.0	\$ 132.87	\$ 664.35
Malla biaxial	m ²	30.9	\$ 4.81	\$ 148.74
COSTO TOTAL DE OBRA (POR METRO LINEAL)				\$ 817

4.4.4.8 Muro de contención gravitacional

En la Figura 85 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 27 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

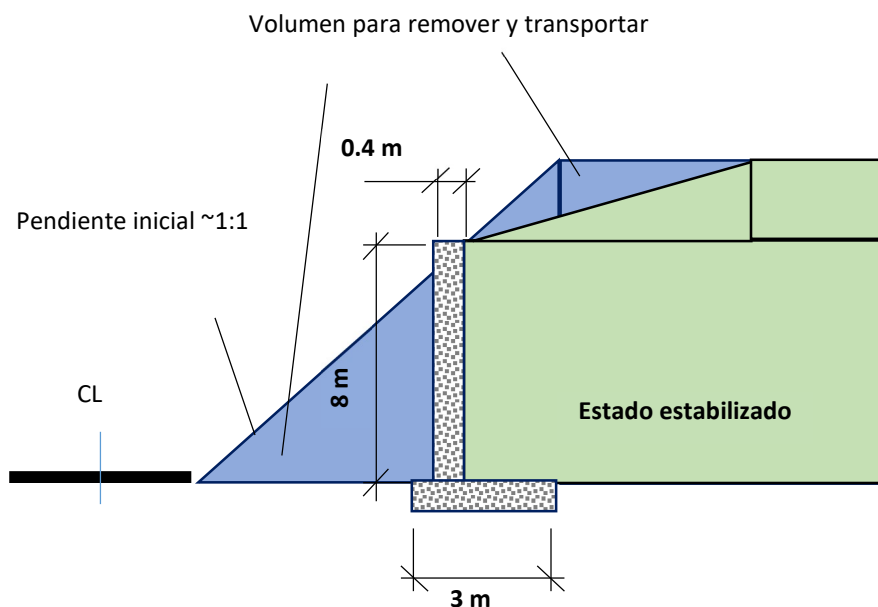


Figura 85. Esquema muro de contención gravitacional

Tabla 27. APU muro de contención gravitacional

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 39.76	\$ 0.40
Cerramiento	m	1.0	\$ 4.04	\$ 4.04
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m³	13.8	\$ 1.46	\$ 20.12
Excavación y relleno para estructura	m³	12.5	\$ 5.79	\$ 72.38
Transporte de materiales de excavación	m³-km	100.9	\$ 0.18	\$ 18.16
Materiales y estructuras				
Bolsas de suelo-cemento (50kg/m³)	m³	0.8	\$ 86.44	\$ 64.83
Construcción de pantallas de concreto reforzado e = 0.40 m	m²	10.0	\$ 132.87	\$ 1,328.70
Área sembrada	m²	5.8	\$ 1.00	\$ 5.83
Malla biaxial	m²	5.8	\$ 4.81	\$ 28.05
COSTO TOTAL DE OBRA (POR METRO LINEAL)				\$ 1,542

4.4.4.9 Retiro de material y hormigón de limpieza

En la Figura 86 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 28 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

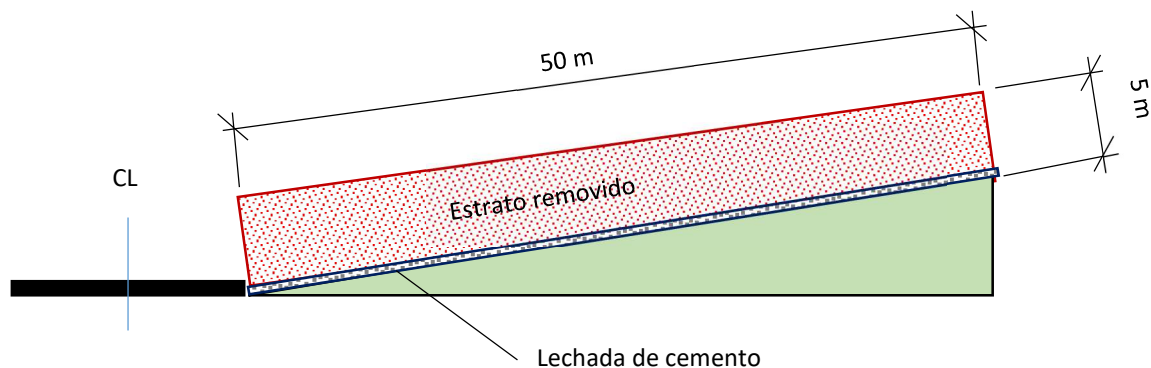


Figura 86. Esquema retiro de material y hormigón de limpieza

Tabla 28. APU retiro de material y hormigón de limpieza

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 39.76	\$ 0.40
Cerramiento	m	1.0	\$ 4.04	\$ 4.04
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m ³	250.0	\$ 1.46	\$ 365.00
Transporte de materiales de excavación	m ³ -km	7,500.0	\$ 0.18	\$ 1,350.00
Materiales y estructuras				
Hormigón de limpieza (fck = 110 kg/cm ²)	m ³	4.0	\$ 89.71	\$ 358.84
COSTO TOTAL DE OBRA (POR METRO LINEAL)				\$ 2,078

4.4.4.10 Mitigación por pérdida de banca

En la Figura 87 se presenta el esquema con las suposiciones realizadas y en la Tabla 29 se presenta el análisis de precios unitarios para la medida de estabilización.

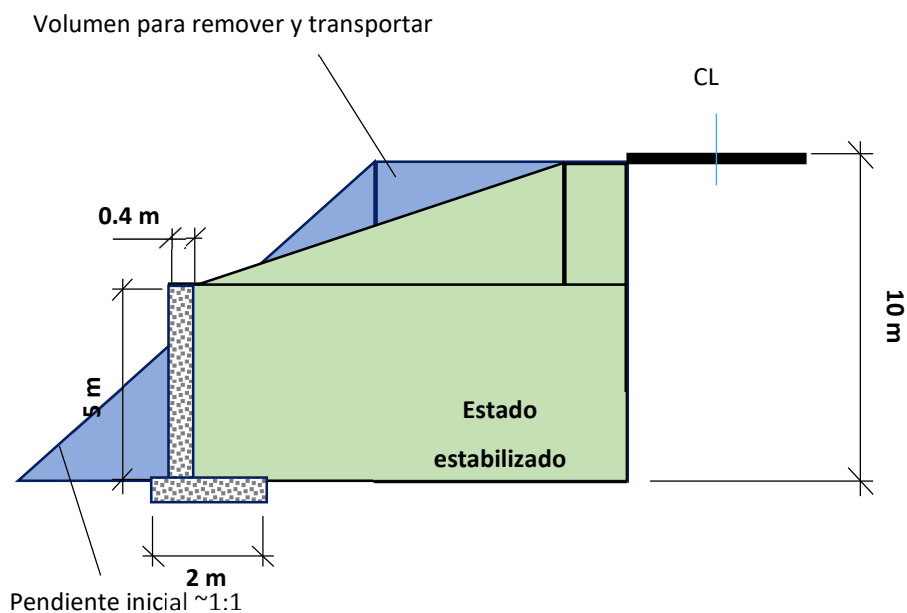


Figura 87. Esquema mitigación por pérdida de banca

Tabla 29. APU mitigación por pérdida de banca

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNIT. (US\$)	VALOR TOTAL (US\$)
Preliminares				
Señales verticales sencillas	pza	0.0	\$ 39.76	\$ 0.40
Cerramiento	m	1.0	\$ 4.04	\$ 4.04
Movimientos de tierras				
Excavación en suelo	m ³	43.2	\$ 1.46	\$ 63.11
Relleno y compactado de terraplenes	m ³	15.6	\$ 2.18	\$ 34.05
Transporte de materiales de excavación	m ³ -km	906.9	\$ 0.18	\$ 163.24
Materiales y estructuras				
Construcción de pantallas de concreto reforzado e = 0.40 m	m ²	7.0	\$ 132.87	\$ 930.09
Malla biaxial	m ²	9.4	\$ 4.81	\$ 45.38
Área sembrada	m ²	9.4	\$ 1.00	\$ 9.43
COSTO TOTAL DE OBRA				\$ 1,249

4.4.5 Costos directos en la situación con obras de mitigación

En el escenario con obras de mitigación se consideran los costos directos generados por deslizamientos de eventos extremos y los costos asociados al mantenimiento preventivo de las obras. Para cuantificar los costos de los eventos extremos se asume que para precipitaciones del catálogo con periodo de retorno mayor a 25 años existe posibilidad de falla en las estructuras de contención y por lo tanto se cuantifican los volúmenes deslizados y su costo. Adicionalmente, es posible que para estos eventos extremos se generen nuevos puntos críticos de deslizamiento, sin embargo, los costos asociados a estos eventos no se consideran pues están fuera del alcance del estudio.

Los costos de mantenimiento preventivos se evalúan considerando las actividades a llevar a cabo antes de la ocurrencia de los eventos y que buscan minimizar las consecuencias de los mismos protegiendo la infraestructura actual. Para el escenario en el que se ejecutan las obras de mitigación se considera un costo anual por mantenimiento equivalente al 1% del total del costo inicial de cada una de las intervenciones.

Tabla 30. Costos unitarios de mantenimiento de las obras de intervención por metro lineal.

OBRA	UNIDAD	VALOR UNIT. (US\$)
Replanteo, control topográfico y medición en obra		
Terraceos con taludes 1:1/2 y protección con biomantos	m	\$ 6.99
Pantallas de hormigón lanzado con anclajes postensados	m	\$ 106.73
Construcción túnel falso	m	\$ 37.39
Muros de contención con concreto reforzado y obras de drenaje	m	\$ 10.82
Muros de contención con gaviones y obras de drenaje	m	\$ 10.54
Muros de contención con gaviones y drenes en espina de pescado	m	\$ 14.39
Pantallas de hormigón lanzado y pernos de anclaje pasivos	m	\$ 57.42

4.5 SELECCIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN EN SITIOS CRÍTICOS

Para cada uno de los sitios críticos de deslizamiento identificados en cada uno de los trazados de estudio (ver Capítulo 3) se lleva a cabo un proceso de georreferenciación y de asignación de los procesos erosivos respectivos. Adicionalmente, en cada uno de estos puntos se evalúan las mejores opciones de medidas estructurales con el fin de evaluar su viabilidad técnica, económica, social y ambiental. El presente estudio se centra principalmente en las evaluaciones de carácter técnico y económico.

Teniendo en cuenta las alternativas de obras de mitigación según la tipología de proceso erosivo, se seleccionan dos posibles tipos de obras para el conjunto de puntos críticos, uno

dando prioridad a las medidas de mitigación verdes y el otro a las medidas grises. Las características de esta asignación se resumen en la Tabla 31.

Tabla 31. Escenarios de intervención

Tipo de deslizamiento	Escenario Verde	Escenario Gris	Pérdida de Banca
Remontante <10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional	
Remontante >10m & <30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados		
Remontante >30m	Túnel falso – Viaducto		
Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza	
Reptaciones	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza	
Taludes de roca	Muro control escombros y malla biaxial	Muro de concreto lanzado con pernos de anclaje	

Con base en este planteamiento se lleva a cabo la valoración económica de la eventual adopción de obras de mitigación grises y verdes en cada uno de los puntos o zonas críticas identificadas. En las Tabla 32 y Tabla 33 se presentan los puntos críticos analizados y el tipo de intervención asociada en cada opción para los trazados 2012 y 2019.

Tabla 32. Medidas de mitigación por escenario para trazado propuesto en 2012

Trazado propuesto en 2012				
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	Intervención Escenario Verde	Intervención Escenario Gris
PC 1	0K+0 a 0K+25	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 2	0K+210 a 0K+250	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 3	1K+70 a 1K+95	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 4	1K+470 a 1K+515	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 5	2K+70 a 2K+105	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 6	1K+900 a 1K+910	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 7	2K+630 a 2K+692.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 8	2K+800 a 2K+880	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 9	3K+0 a 3K+37.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 10	3K+100 a 3K+142.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 11	3K+300 a 3K+332.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 12	3K+720 a 3K+757.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 13	3K+900 a 3K+935	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados

Trazado propuesto en 2012				
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	Intervención Escenario Verde	Intervención Escenario Gris
PC 14	4K+300 a 4K+346	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 15	4K+750 a 4K+810	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 16	5K+600 a 5K+677.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 17	6K+300 a 6K+327.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 18	7K+830 a 7K+870	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 19	8K+340 a 8K+425	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 20	9K+500 a 9K+575	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 21	9K+700 a 9K+775	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 22	10K+400 a 10K+445	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 23	11K+220 a 11K+255	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 24	11K+680 a 11K+720	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 25	12K+250 a 12K+330	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 26	12K+800 a 12K+870	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 27	14K+750 a 14K+815	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 28	17K+220 a 17K+267.5	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 29	17K+740 a 17K+833	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 30	19K+0 a 19K+57.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 31	20K+200 a 20K+275	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 32	22K+320 a 22K+430	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 33	24K+250 a 24K+345	Remontante 30m<h	Túnel falso – Viaducto	Túnel falso – Viaducto
PC 34	26K+300 a 26K+350	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 35	26K+750 a 26K+787.5	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 36	26K+787.5 a 26K+825	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 37	27K+100 a 27K+325	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 38	27K+550 a 27K+575	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 39	27K+700 a 27K+750	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 40	27K+800 a 27K+825	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 41	28K+0 a 28K+50	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 42	28K+200 a 28K+250	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 43	28K+300 a 28K+350	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 44	28K+700 a 28K+750	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 45	28K+800 a 28K+850	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza

Trazado propuesto en 2012				
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	Intervención Escenario Verde	Intervención Escenario Gris
PC 46	29K+0 a 29K+100	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 47	29K+400 a 29K+450	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 48	29K+500 a 29K+550	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 49	30K+200 a 30K+240	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 50	32K+150 a 32K+202.5	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 51	32K+280 a 32K+345	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 52	32K+300 a 32K+402.5	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 53	33K+800 a 33K+830	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 54	34K+700 a 34K+845	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 55	35K+320 a 35K+380	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 56	35K+750 a 35K+780	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 57	36K+0 a 36K+37.5	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 58	36K+350 a 36K+410	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 59	36K+800 a 36K+895	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 60	37K+130 a 37K+162.5	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 61	37K+550 a 37K+590	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 62	37K+880 a 37K+950	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 63	38K+250 a 38K+305	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 64	39K+200 a 39K+280	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 65	39K+320 a 39K+370	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 66	39K+520 a 39K+580	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 67	40K+360 a 40K+420	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 68	40K+870 a 40K+940	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 69	41K+170 a 41K+320	Remontante 30m<h	Túnel falso – Viaducto	Túnel falso – Viaducto
PC 70	41K+700 a 41K+738.5	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 71	41K+820 a 41K+837.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 72	42K+120 a 42K+215	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 73	44K+220 a 44K+260	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 74	44K+450 a 44K+475	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 75	47K+0 a 47K+50	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 76	47K+200 a 47K+250	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 77	48K+800 a 48K+875	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional

Trazado propuesto en 2012				
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	Intervención Escenario Verde	Intervención Escenario Gris
PC 78	47K+500 a 47K+700	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 79	50K+0 a 50K+325	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 80	50K+900 a 51K+50	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 81	51K+250 a 51K+325	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza

Tabla 33. Medidas de mitigación por escenario para trazado propuesto en 2019

Trazado propuesto en 2019				
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	Intervención Escenario Verde	Intervención Escenario Gris
PC 1	0K+0 a 0K+25	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 2	0K+210 a 0K+250	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 3	1K+70 a 1K+95	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 4	1K+470 a 1K+515	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 5	2K+70 a 2K+105	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 6	1K+900 a 1K+910	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 7	2K+630 a 2K+692.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 8	2K+800 a 2K+880	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 9	3K+0 a 3K+37.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 10	3K+100 a 3K+142.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 11	3K+300 a 3K+332.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 12	3K+720 a 3K+757.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 13	3K+900 a 3K+935	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 14	4K+300 a 4K+346	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 15	4K+750 a 4K+810	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 16	5K+600 a 5K+677.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 17	6K+300 a 6K+327.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 18	7K+830 a 7K+870	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 19	8K+340 a 8K+425	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 20	9K+500 a 9K+575	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 21	9K+700 a 9K+775	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 22	10K+400 a 10K+445	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 23	11K+220 a 11K+255	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 24	11K+680 a 11K+720	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 25	12K+250 a 12K+330	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados

Trazado propuesto en 2019				
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	Intervención Escenario Verde	Intervención Escenario Gris
PC 26	12K+800 a 12K+870	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 27	14K+750 a 14K+815	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 28	17K+220 a 17K+267.5	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 29	17K+740 a 17K+833	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 30	19K+0 a 19K+57.5	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 31	20K+200 a 20K+275	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 32	22K+320 a 22K+430	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 33	24K+250 a 24K+345	Remontante 30m<h	Túnel falso – Viaducto	Túnel falso – Viaducto
PC 34	26K+300 a 26K+350	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 35	26K+750 a 26K+787.5	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 36	26K+787.5 a 26K+825	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 37	27K+100 a 27K+325	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 38	27K+550 a 27K+575	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 39	27K+700 a 27K+750	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 40	27K+800 a 27K+825	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 41	28K+0 a 28K+50	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 42	28K+200 a 28K+250	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 43	28K+300 a 28K+350	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 44	28K+700 a 28K+750	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 45	28K+800 a 28K+850	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 46	29K+0 a 29K+100	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 47	29K+400 a 29K+450	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 48	29K+500 a 29K+550	Reptación	Muro en gaviones y drenajes horizontales	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 49	29K+600 a 29K+700	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 50	29K+800 a 29K+825	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 51	30K+0 a 30K+50	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 52	30K+700 a 30K+850	Talud Rocoso	Muro control escombros y malla biaxial	Muro de concreto lanzado con pernos de anclaje
PC 53	31K+0 a 31K+75	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 54	32K+600 a 32K+675	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 55	33K+0 a 33K+100	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 56	33K+250 a 33K+350	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 57	33K+600 a 33K+675	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional

Trazado propuesto en 2019				
PC	Abcisdado	Tipo deslizamiento	Intervención Escenario Verde	Intervención Escenario Gris
PC 58	34K+200 a 34K+300	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 59	34K+400 a 34K+600	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 60	35K+0 a 35K+75	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 61	35K+300 a 35K+375	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 62	35K+500 a 35K+625	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 63	36K+100 a 36K+125	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 64	37K+400 a 37K+600	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 65	38K+100 a 38K+200	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 66	39K+0 a 39K+50	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 67	39K+300 a 39K+600	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 68	40K+500 a 40K+575	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 69	40K+600 a 40K+650	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 70	41K+100 a 41K+150	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 71	41K+300 a 41K+350	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 72	41K+400 a 41K+450	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 73	41K+750 a 42K+0	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 74	42K+700 a 43K+0	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 75	44K+500 a 44K+650	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 76	44K+700 a 44K+800	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 77	47K+0 a 47K+50	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 78	47K+200 a 47K+250	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 79	48K+800 a 48K+875	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 80	47K+500 a 47K+700	Remontante h<10m	Conformación del talud y restitución de la capa vegetal	Muro de contención gravitacional
PC 81	50K+0 a 50K+325	Remontante 10m<h<30m	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados	Pantalla de concreto con anclajes pre esforzados
PC 82	50K+900 a 51K+50	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza
PC 83	51K+250 a 51K+325	Flujos de tierra	Muro en gaviones y drenajes en espina de pescado	Retiro de material y hormigón de limpieza

En la Tabla 34 se presenta la comparación de los presupuestos totales de obras de estabilización de taludes en los dos trazados planteados y para la totalidad de los puntos y zonas críticas identificadas.

Tabla 34. Presupuesto obras de mitigación para los trazados analizados

TIPO DE DESLIZAMIENTO	VALOR UNIT. VERDE (US\$)	VALOR UNIT. GRIS (US\$)	TRAZADO PROPUESTO EN 2012 VALOR TOTAL OP. VERDE OP. GRIS (US\$) (US\$)		TRAZADO PROPUESTO EN 2019 VALOR TOTAL OP. VERDE OP. GRIS (US\$) (US\$)	
Remontante h<=10 m	\$ 699	\$ 1,543	\$ 614,392	\$ 1,355,090	\$ 1,216,895	\$ 2,683,957
Remontante 10 m< h <=30 m	\$ 9,577	\$ 9,577	\$ 20,384,371	\$ 20,384,371	\$ 16,673,333	\$ 16,673,333
Remontante h >=30 m	\$ 3,739	\$ 3,739	\$ 916,141	\$ 916,141	\$ 355,238	\$ 355,238
Reptación	\$ 1,082	\$ 2,078	\$ 839,240	\$ 1,611,709	\$ 492,939	\$ 946,658
Flujos de tierra	\$ 1,339	\$ 2,078	\$ 1,613,611	\$ 2,504,332	\$ 3,381,219	\$ 5,247,666
Taludes rocosos	\$ 818	\$ 5,742	\$ 0	\$ 0	\$ 122,630	\$ 861,310
Pérdida de banca	\$ 1,250	\$ 1,250	\$ 1,964,605	\$ 1,964,605	\$ 2,263,295	\$ 2,263,295
COSTO TOTAL DEL PROYECTO			\$ 26,332,361	\$ 28,736,248	\$ 24,505,549	\$ 29,031,458
COSTO UNITARIO POR KM			\$ 506,392	\$ 552,620	\$ 471,261	\$ 558,297

4.6 BENEFICIOS POR LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN

4.6.1 Beneficios anuales y frecuencias

Una vez se tienen los costos directos e indirectos en la situación sin obras de mitigación y se estiman adicionalmente los costos anuales asociados al mantenimiento preventivo de las eventuales obras de mitigación implementadas, es posible estimar el beneficio anual esperado que se generaría por la construcción de las obras seleccionadas. Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$Beneficio_{anual} = Costos_{Sin Obras} - Costos_{Con Obras}$$

En donde $Costos_{pSin Obras}$ se refiere a la suma suma de los costos directos por remoción de escombros y los indirectos por interrupción de tráfico y $Costos_{Con Obras}$ se refiere a los costos asociados al mantenimiento anual posterior a la ejecución de las obras de mitigación.

Teniendo esto en cuenta, los beneficios se calculan para cada uno de los años considerados en el catálogo de eventos estocásticos de lluvia (1000 años) y por lo tanto es posible establecer un histograma de frecuencias para cada uno de los escenarios de mitigación propuestos. Los resultados se presentan en la Figura 88.

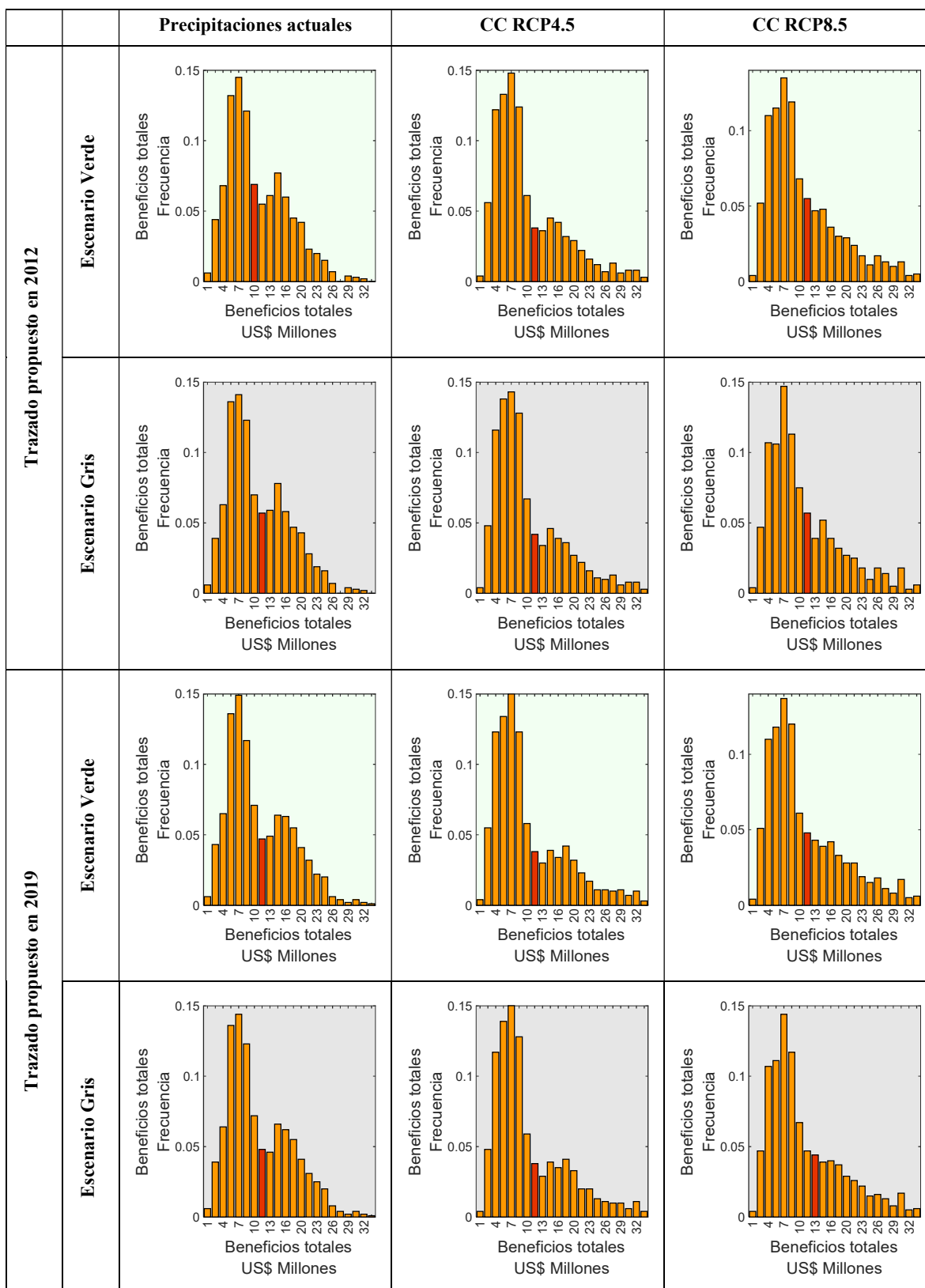


Figura 88. Beneficios generados por la implementación de las obras

Teniendo en cuenta lo anterior, se calculan los valores esperados de las distribuciones de pérdidas, los resultados se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35. Valores esperados anuales de costos y beneficios

Trazado propuesto en	Tipo de intervención	Escenario de precipitaciones	Valor esperado de beneficios anuales (US\$ Millones)
2012	Verde	Actual	10.87
		RCP 4.5	11.56
		RCP 8.5	12.27
	Gris	Actual	10.99
		RCP 4.5	11.68
		RCP 8.5	12.39
2019	Verde	Actual	11.06
		RCP 4.5	11.7
		RCP 8.5	12.44
	Gris	Actual	11.16
		RCP 4.5	11.8
		RCP 8.5	12.54

Los resultados anteriores se presentan gráficamente en la Figura 89.

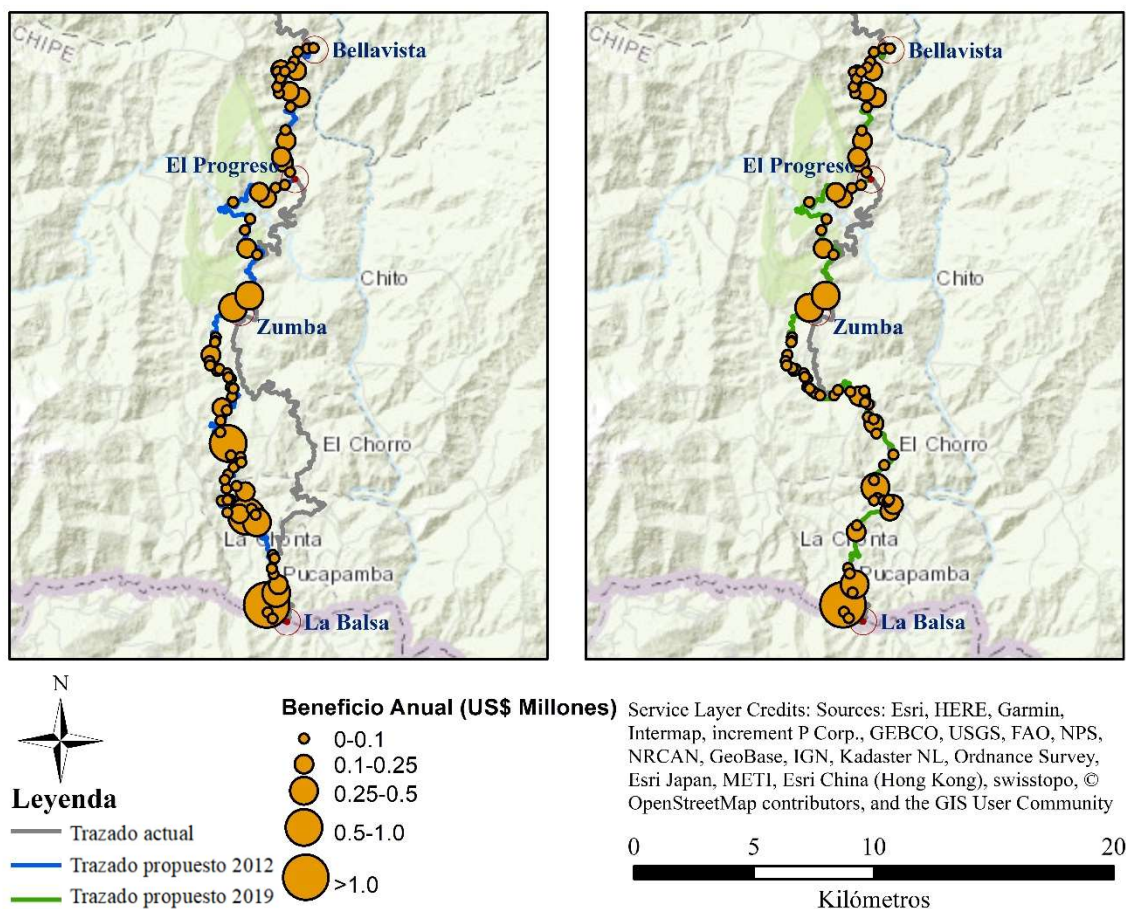


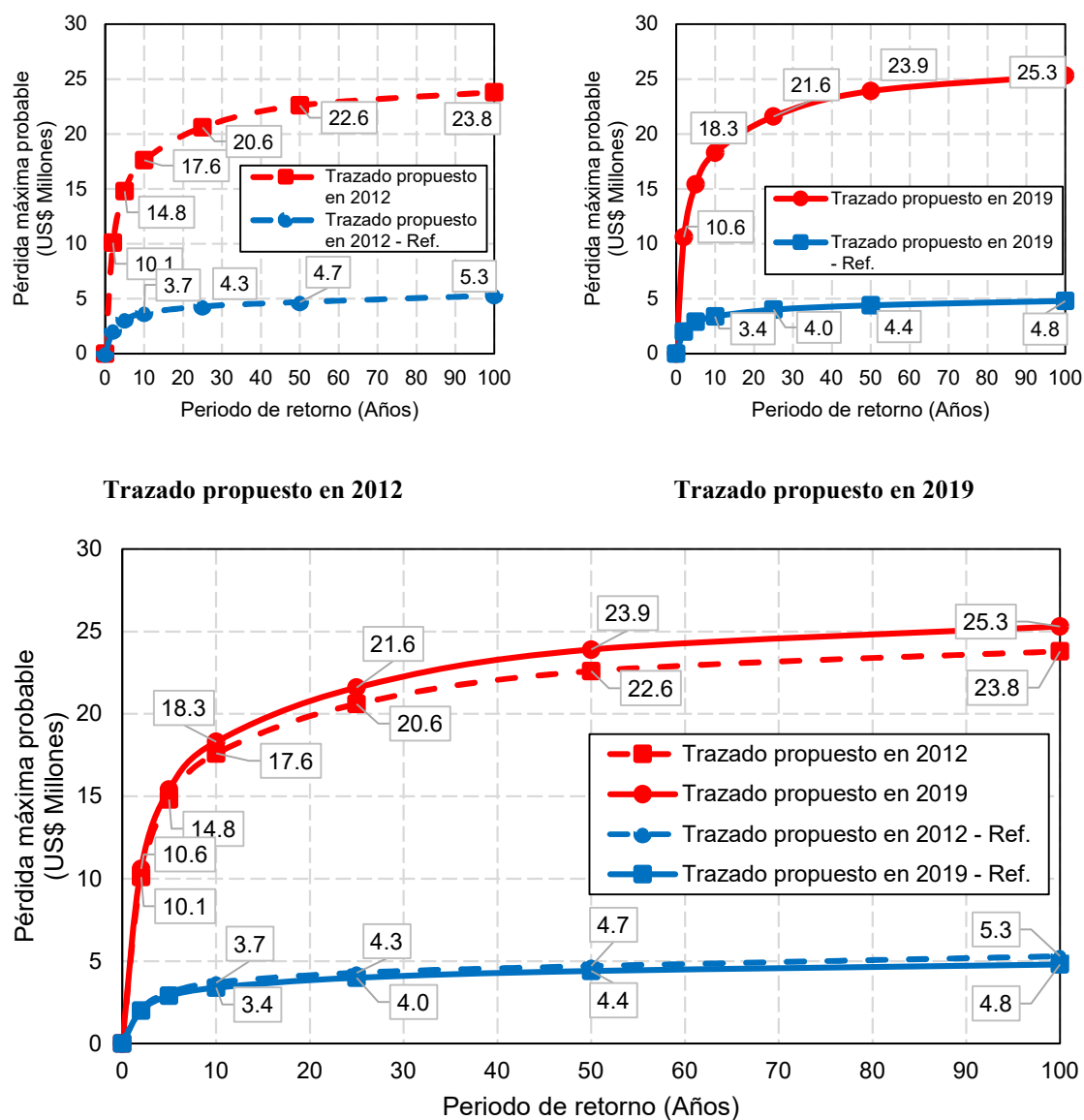
Figura 89. Beneficio anual esperado por punto crítico

A partir de los datos anteriores se identificó la reducción en tiempo de interrupción del servicio después de realizadas las obras. Dado que las obras deben ser diseñadas con el mismo periodo de retorno se espera la misma efectividad en los dos escenarios. Teniendo en cuenta que las obras se pre dimensionaron para un periodo de retorno de 50 años, las precipitaciones que superen este límite van a activar nuevos puntos críticos, así como también pueden generar fallas en los puntos identificados. Teniendo esto en cuenta, se filtran los resultados con este criterio obteniendo un valor esperado de 20 días de interrupción por año.

4.6.2 Pérdida máxima probables y beneficios correspondientes

A partir de los resultados anteriores también es posible calcular una curva de Pérdidas Máximas Probables para cada uno de los trazados en el escenario actual y el reforzado. Estas curvas relacionan el periodo de retorno con las pérdidas máximas probables, los resultados de este análisis se presentan en la Figura 90 para el trazado propuesto en 2012 y en 2019.

Como es evidente, se presenta una reducción del riesgo significativo al realizar las obras de estabilización, sin embargo, es importante aclarar que siempre va a existir un riesgo residual. Este riesgo se puede identificar en las curvas del escenario reforzado.



4.6.3 Evaluación beneficio costo y eficiencias de las medidas

A partir del análisis indicado anteriormente, se realiza el análisis beneficio – costo para cada punto crítico en cada trazado. Este indicador consiste en dividir los beneficios obtenidos por cada una de las medidas por los costos de estas como se indica en la siguiente ecuación:

$$BC = \frac{Beneficios_{anuales}}{Costos * i}$$

En este caso, los beneficios se asumen a perpetuidad con una tasa de descuento $i = 12\%$. De la Figura 91 a la Figura 94 se puede identificar que la mayor parte de los puntos, dan beneficio – costo mayor a 1.0, por lo tanto, se considera que estas obras son viables a nivel financiero. También se puede analizar que los resultados obtenidos en los escenarios de medidas verdes son mejores que las medidas grises propuestas por lo que se deben priorizar este tipo de medidas en el proyecto.

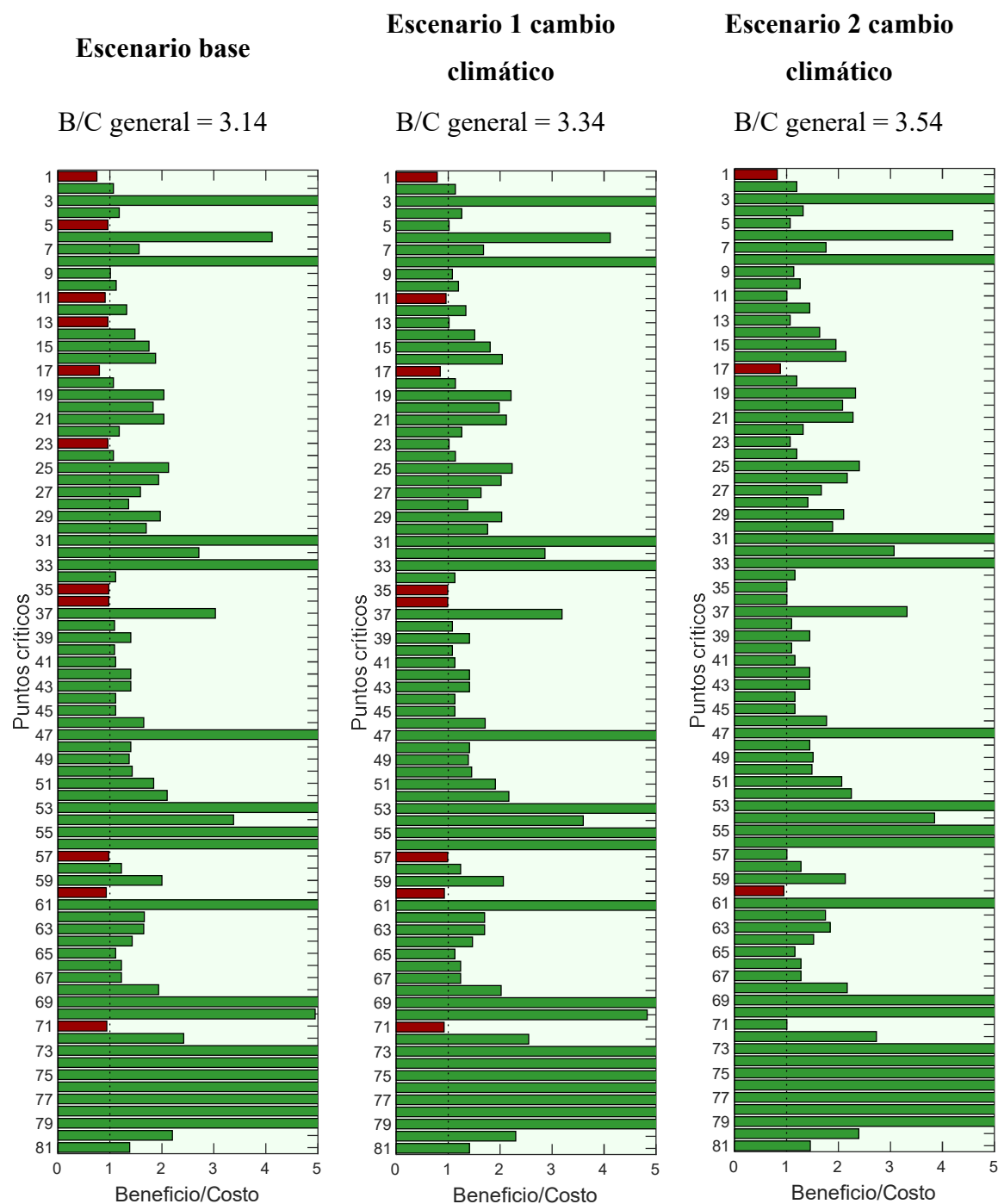


Figura 91. Relación beneficio – costo de las obras identificadas en los puntos críticos para el escenario verde en el trazado propuesto en 2012

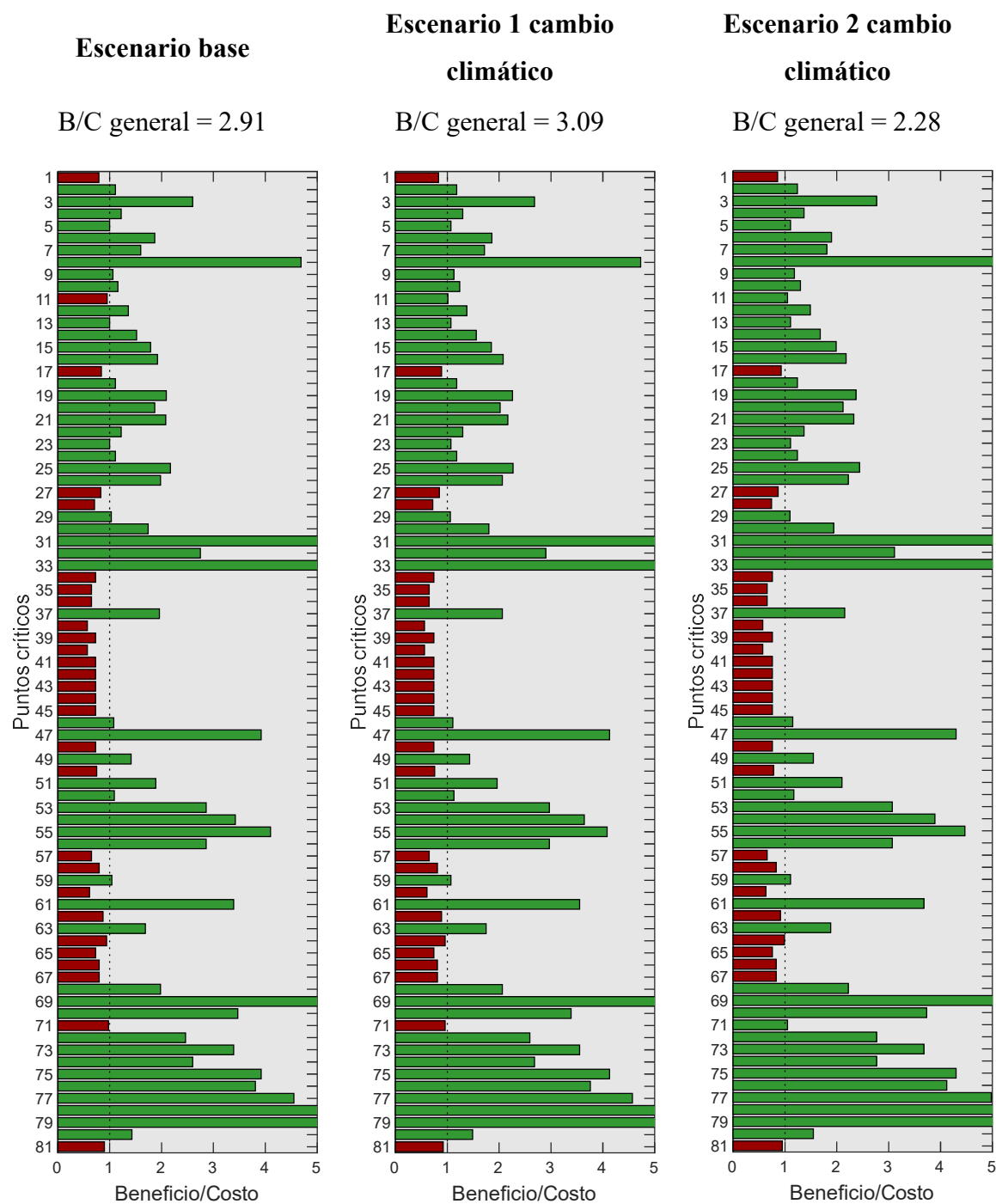


Figura 92. Relación beneficio – costo de las obras identificadas en los puntos críticos para el escenario gris en el trazado propuesto en 2012

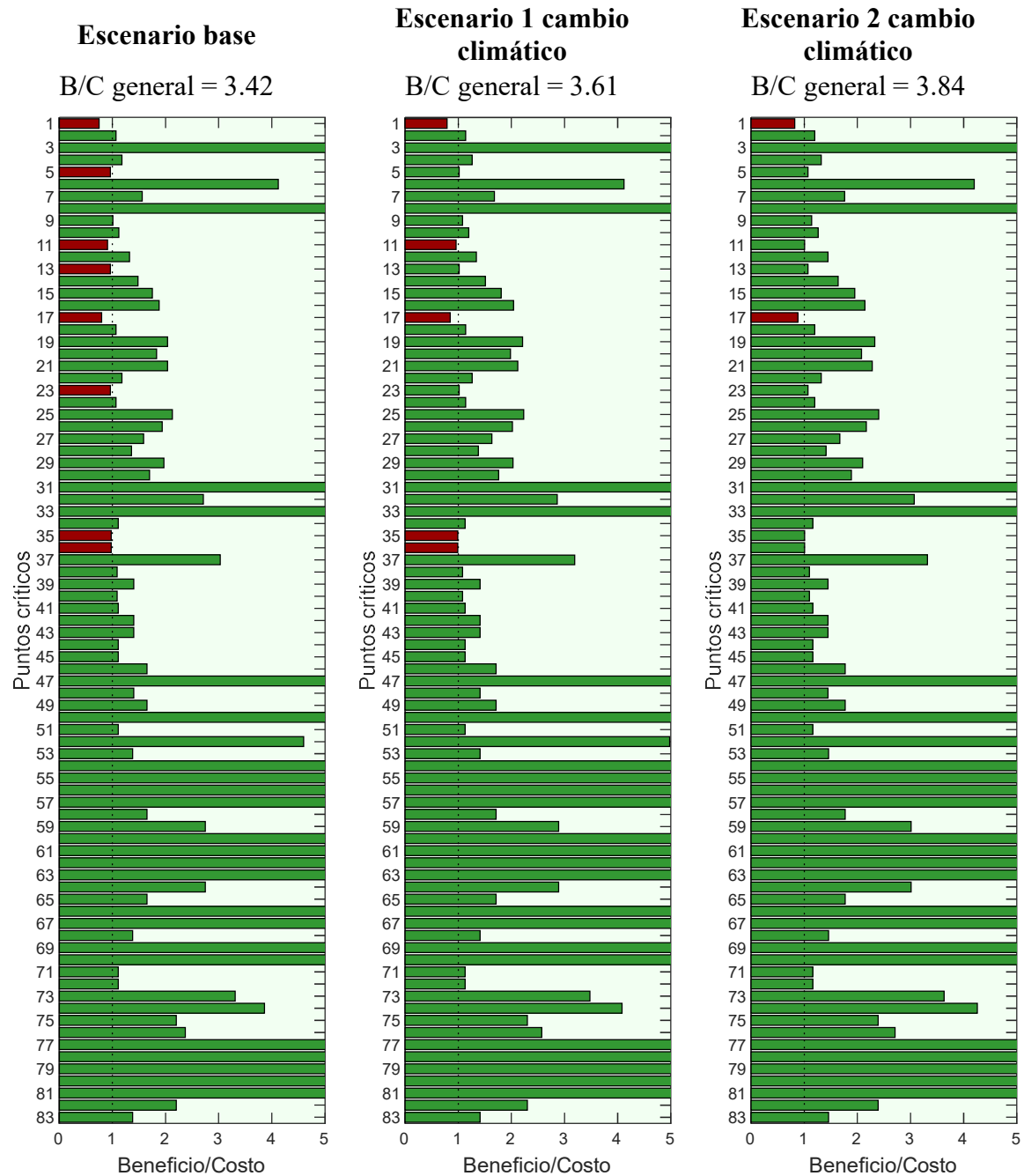


Figura 93. Relación beneficio – costo de las obras identificadas en los puntos críticos para el escenario verde en el trazado propuesto en 2019

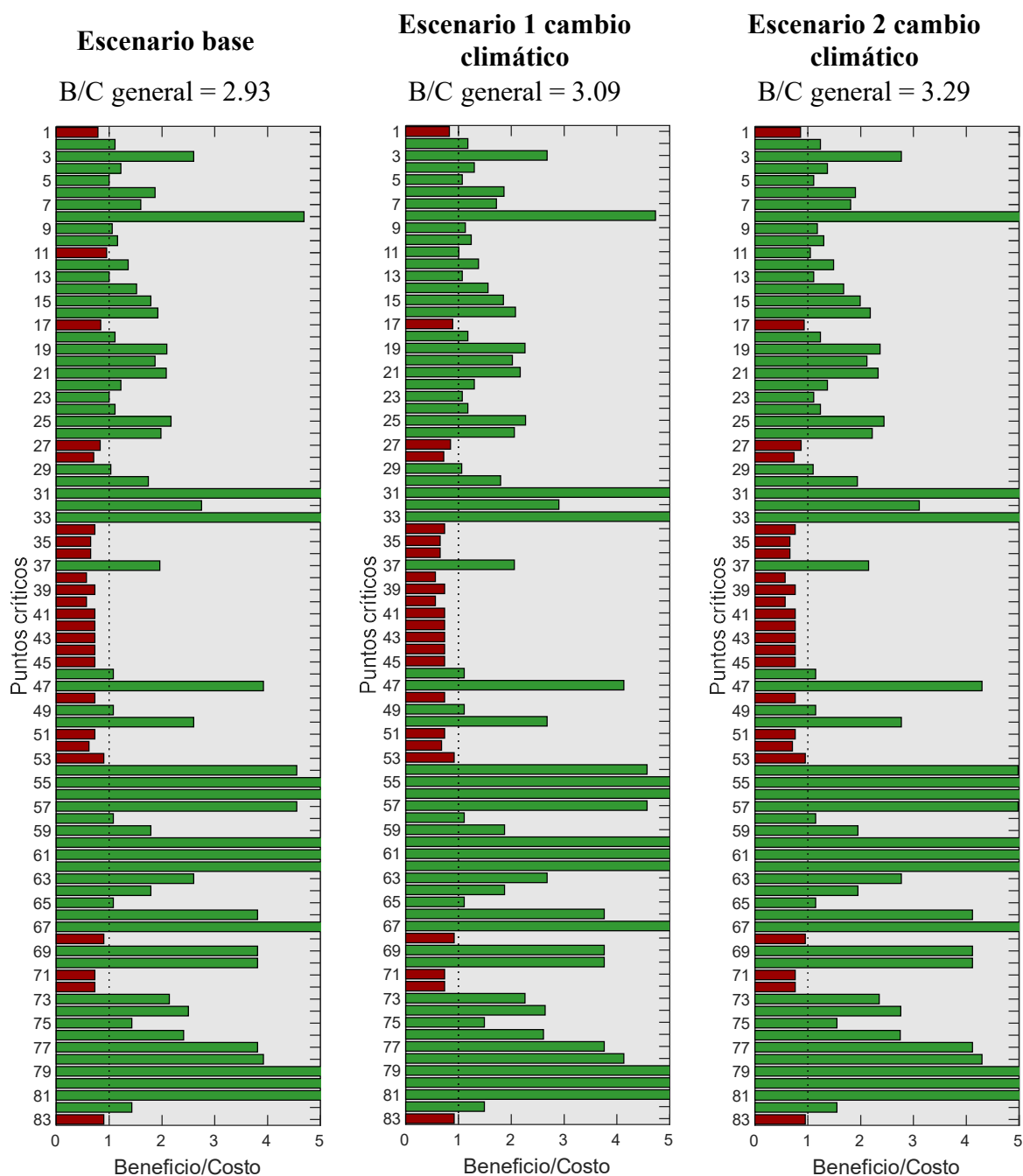


Figura 94. Relación beneficio – costo de las obras identificadas en los puntos críticos para el escenario gris en el trazado propuesto en 2019

Por último, se calcula la relación eficiencia costo con el fin de priorizar cada una de las obras de mitigación planteadas en cada punto crítico. Este indicador está basado en el BC obtenido anteriormente, afectando el indicador por la longitud como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$EC = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Costos}} * \text{Longitud Intervenida}$$

En la Tabla 36 se presenta la priorización para el trazado propuesto en 2012 y en la Tabla 37 se presenta la priorización para el trazado propuesto en 2019. Estas priorizaciones se realizan para el escenario verde pues es el más costo eficiente considerando precipitaciones actuales (los valores absolutos del indicador serán mayores al considerar los escenarios de cambio climático sin embargo el orden relativo será el mismo). Vale la pena aclarar que este no es el único criterio de priorización existente y que el resultado puede variar al considerar nuevos factores como la susceptibilidad al deslizamiento promedio. Adicionalmente, se clasifican los puntos de intervención según su el criterio E/C. todos los puntos con E/C mayor a 400 se clasifican como grupo A (mayor importancia), los puntos con valores entre 400 y 40 se clasifican en el grupo B (importancia media-alta) y los puntos con E/C menor a 40 se categorizan en el grupo C (importancia media). Vale la pena aclarar que estos puntos se deben verificar en cuanto a ubicación, tipo de deslizamiento y medida de mitigación.

Tabla 36. Priorización de intervenciones mediante criterio E/C para trazado propuesto en 2012

Trazado propuesto en 2012						
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	E/C	Costo Intervención (US\$)	Costo Intervención acumulado (US\$ Millones)	Grupo de Intervención
PC 78	47K+500 a 47K+700	Remontante h<10m	5272.13	\$ 139,873	\$ 0.14	A
PC 79	50K+0 a 50K+325	Remontante 10m<h<30m	2359.67	\$ 3,112,483	\$ 3.25	A
PC 69	41K+170 a 41K+320	Remontante h>30m	1565.92	\$ 748,365	\$ 4.00	A
PC 31	20K+200 a 20K+275	Remontante h<10m	868.98	\$ 52,452	\$ 4.05	A
PC 37	27K+100 a 27K+325	Flujos de tierra	681.93	\$ 301,297	\$ 4.35	A
PC 33	24K+250 a 24K+345	Remontante h>30m	680.14	\$ 473,965	\$ 4.83	A
PC 8	2K+800 a 2K+880	Remontante h<10m	536.09	\$ 155,929	\$ 4.98	A
PC 54	34K+700 a 34K+845	Remontante 10m<h<30m	490.31	\$ 1,569,860	\$ 6.55	A
PC 77	48K+800 a 48K+875	Remontante h<10m	486.72	\$ 146,184	\$ 6.70	A
PC 47	29K+400 a 29K+450	Remontante h<10m	432.27	\$ 34,968	\$ 6.74	A
PC 75	47K+0 a 47K+50	Remontante h<10m	432.27	\$ 34,968	\$ 6.77	A
PC 55	35K+320 a 35K+380	Remontante h<10m	351.35	\$ 116,947	\$ 6.89	B
PC 80	50K+900 a 51K+50	Flujos de tierra	330.37	\$ 200,864	\$ 7.09	B
PC 61	37K+550 a 37K+590	Remontante h<10m	299.06	\$ 27,975	\$ 7.12	B
PC 73	44K+220 a 44K+260	Remontante h<10m	299.06	\$ 27,975	\$ 7.14	B
PC 32	22K+320 a 22K+430	Remontante 10m<h<30m	297.97	\$ 1,190,928	\$ 8.34	B
PC 76	47K+200 a 47K+250	Remontante h<10m	271.72	\$ 97,456	\$ 8.43	B
PC 72	42K+120 a 42K+215	Remontante 10m<h<30m	229.95	\$ 1,028,529	\$ 9.46	B
PC 52	32K+300 a 32K+402.5	Reptación	215.11	\$ 110,925	\$ 9.57	B
PC 70	41K+700 a 41K+738.5	Remontante h<10m	190.64	\$ 75,041	\$ 9.65	B
PC 59	36K+800 a 36K+895	Reptación	189.75	\$ 102,808	\$ 9.75	B
PC 53	33K+800 a 33K+830	Remontante h<10m	189.39	\$ 20,981	\$ 9.77	B
PC 56	35K+750 a 35K+780	Remontante h<10m	189.39	\$ 20,981	\$ 9.79	B
PC 29	17K+740 a 17K+833	Reptación	183.22	\$ 100,644	\$ 9.89	B
PC 19	8K+340 a 8K+425	Remontante 10m<h<30m	173.79	\$ 814,034	\$ 10.71	B
PC 25	12K+250 a 12K+330	Remontante 10m<h<30m	170.60	\$ 866,130	\$ 11.57	B
PC 46	29K+0 a 29K+100	Flujos de tierra	165.28	\$ 133,910	\$ 11.71	B
PC 21	9K+700 a 9K+775	Remontante 10m<h<30m	152.73	\$ 811,997	\$ 12.52	B
PC 16	5K+600 a 5K+677.5	Remontante 10m<h<30m	145.84	\$ 742,208	\$ 13.26	B
PC 3	1K+70 a 1K+95	Remontante h<10m	143.48	\$ 17,484	\$ 13.28	B

Trazado propuesto en 2012						
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	E/C	Costo Intervención (US\$)	Costo Intervención acumulado (US\$ Millones)	Grupo de Intervención
PC 74	44K+450 a 44K+475	Remontante h<10m	143.48	\$ 17,484	\$ 13.30	B
PC 20	9K+500 a 9K+575	Remontante 10m<h<30m	137.06	\$ 718,265	\$ 14.01	B
PC 26	12K+800 a 12K+870	Remontante 10m<h<30m	135.83	\$ 757,863	\$ 14.77	B
PC 68	40K+870 a 40K+940	Remontante 10m<h<30m	135.83	\$ 757,863	\$ 15.53	B
PC 51	32K+280 a 32K+345	Remontante 10m<h<30m	119.89	\$ 703,730	\$ 16.23	B
PC 62	37K+880 a 37K+950	Reptación	116.23	\$ 75,753	\$ 16.31	B
PC 64	39K+200 a 39K+280	Flujos de tierra	114.75	\$ 107,128	\$ 16.42	B
PC 15	4K+750 a 4K+810	Remontante 10m<h<30m	104.91	\$ 649,597	\$ 17.07	B
PC 27	14K+750 a 14K+815	Reptación	103.63	\$ 70,343	\$ 17.14	B
PC 81	51K+250 a 51K+325	Flujos de tierra	103.52	\$ 100,432	\$ 17.24	B
PC 30	19K+0 a 19K+57.5	Remontante 10m<h<30m	97.78	\$ 622,531	\$ 17.86	B
PC 7	2K+630 a 2K+692.5	Remontante 10m<h<30m	97.27	\$ 598,554	\$ 18.46	B
PC 63	38K+250 a 38K+305	Remontante 10m<h<30m	90.90	\$ 595,464	\$ 19.05	B
PC 50	32K+150 a 32K+202.5	Reptación	75.01	\$ 56,815	\$ 19.11	B
PC 58	36K+350 a 36K+410	Flujos de tierra	73.11	\$ 80,346	\$ 19.19	B
PC 66	39K+520 a 39K+580	Flujos de tierra	73.11	\$ 80,346	\$ 19.27	B
PC 67	40K+360 a 40K+420	Flujos de tierra	73.11	\$ 80,346	\$ 19.35	B
PC 39	27K+700 a 27K+750	Reptación	69.81	\$ 54,110	\$ 19.41	B
PC 42	28K+200 a 28K+250	Reptación	69.81	\$ 54,110	\$ 19.46	B
PC 43	28K+300 a 28K+350	Reptación	69.81	\$ 54,110	\$ 19.51	B
PC 48	29K+500 a 29K+550	Reptación	69.81	\$ 54,110	\$ 19.57	B
PC 14	4K+300 a 4K+346	Remontante 10m<h<30m	68.09	\$ 498,025	\$ 20.07	B
PC 28	17K+220 a 17K+267.5	Reptación	64.81	\$ 51,404	\$ 20.12	B
PC 34	26K+300 a 26K+350	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 20.18	B
PC 41	28K+0 a 28K+50	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 20.25	B
PC 44	28K+700 a 28K+750	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 20.32	B
PC 45	28K+800 a 28K+850	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 20.38	B
PC 65	39K+320 a 39K+370	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 20.45	B
PC 49	30K+200 a 30K+240	Remontante 10m<h<30m	54.61	\$ 433,065	\$ 20.88	B
PC 4	1K+470 a 1K+515	Remontante 10m<h<30m	52.96	\$ 430,959	\$ 21.32	B
PC 22	10K+400 a 10K+445	Remontante 10m<h<30m	52.96	\$ 430,959	\$ 21.75	B
PC 12	3K+720 a 3K+757.5	Remontante 10m<h<30m	49.41	\$ 405,998	\$ 22.15	B
PC 10	3K+100 a 3K+142.5	Remontante 10m<h<30m	47.72	\$ 407,017	\$ 22.56	B
PC 2	0K+210 a 0K+250	Remontante 10m<h<30m	42.75	\$ 383,075	\$ 22.94	B
PC 18	7K+830 a 7K+870	Remontante 10m<h<30m	42.75	\$ 383,075	\$ 23.33	B
PC 24	11K+680 a 11K+720	Remontante 10m<h<30m	42.75	\$ 383,075	\$ 23.71	B
PC 6	1K+900 a 1K+910	Remontante h<10m	41.24	\$ 6,994	\$ 23.72	B
PC 9	3K+0 a 3K+37.5	Remontante 10m<h<30m	38.06	\$ 359,133	\$ 24.08	C
PC 35	26K+750 a 26K+787.5	Flujos de tierra	36.87	\$ 50,216	\$ 24.13	C
PC 36	26K+787.5 a 26K+825	Flujos de tierra	36.87	\$ 50,216	\$ 24.18	C
PC 57	36K+0 a 36K+37.5	Flujos de tierra	36.87	\$ 50,216	\$ 24.23	C
PC 5	2K+70 a 2K+105	Remontante 10m<h<30m	33.63	\$ 335,191	\$ 24.56	C
PC 13	3K+900 a 3K+935	Remontante 10m<h<30m	33.63	\$ 335,191	\$ 24.90	C
PC 23	11K+220 a 11K+255	Remontante 10m<h<30m	33.63	\$ 335,191	\$ 25.23	C
PC 60	37K+130 a 37K+162.5	Flujos de tierra	30.32	\$ 43,521	\$ 25.27	C
PC 11	3K+300 a 3K+332.5	Remontante 10m<h<30m	29.48	\$ 311,248	\$ 25.59	C
PC 38	27K+550 a 27K+575	Reptación	27.19	\$ 27,055	\$ 25.61	C
PC 40	27K+800 a 27K+825	Reptación	27.19	\$ 27,055	\$ 25.64	C
PC 17	6K+300 a 6K+327.5	Remontante 10m<h<30m	21.99	\$ 263,364	\$ 25.90	C
PC 1	0K+0 a 0K+25	Remontante 10m<h<30m	18.65	\$ 239,422	\$ 26.14	C
PC 71	41K+820 a 41K+837.5	Remontante 10m<h<30m	16.42	\$ 189,466	\$ 26.33	C

Tabla 37. Priorización de intervenciones mediante criterio E/C para trazado propuesto en 2019

Trazado propuesto en 2019						
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	E/C	Costo Intervención (US\$)	Costo Acumulado (US\$ Millones)	Grupo de Intervención
PC 67	39K+350 a 39K+550	Remontantes h<10m	2358.15	\$ 389,823	\$ 0.4	A
PC 80	47K+500 a 47K+700	Remontantes h<10m	2358.15	\$ 389,823	\$ 0.78	A
PC 81	50K+0 a 50K+325	Remontante 10m<h<30m	2223.75	\$ 3,518,652	\$ 4.30	A
PC 55	33K+0 a 33K+100	Remontantes h<10m	1453.71	\$ 69,936	\$ 4.37	A
PC 74	42K+700 a 43K+0	Flujos de tierra	1158.29	\$ 401,729	\$ 4.77	A
PC 62	35K+500 a 35K+625	Remontantes h<10m	1076.05	\$ 243,639	\$ 5.01	A
PC 31	20K+200 a 20K+275	Remontantes h<10m	868.98	\$ 52,452	\$ 5.07	A
PC 60	35K+0 a 35K+75	Remontantes h<10m	868.98	\$ 52,452	\$ 5.12	A
PC 61	35K+300 a 35K+375	Remontantes h<10m	868.98	\$ 52,452	\$ 5.17	A
PC 79	48K+800 a 48K+875	Remontantes h<10m	868.98	\$ 52,452	\$ 5.22	A
PC 73	41K+750 a 42K+0	Flujos de tierra	826.89	\$ 334,774	\$ 5.56	A
PC 56	33K+250 a 33K+350	Remontantes h<10m	754.83	\$ 194,911	\$ 5.75	A
PC 52	30K+700 a 30K+850	Inestabilidad de taludes rocosos	689.47	\$ 122,630	\$ 5.88	A
PC 37	27K+100 a 27K+325	Flujos de tierra	681.93	\$ 301,297	\$ 6.18	A
PC 33	24K+250 a 24K+345	Remontantes h>30m	680.14	\$ 473,965	\$ 6.65	A
PC 59	34K+400 a 34K+600	Flujos de tierra	550.91	\$ 267,819	\$ 6.92	A
PC 64	37K+400 a 37K+600	Flujos de tierra	550.91	\$ 267,819	\$ 7.19	A
PC 8	2K+800 a 2K+880	Remontantes h<10m	536.09	\$ 155,929	\$ 7.34	A
PC 54	32K+600 a 32K+675	Remontantes h<10m	486.72	\$ 146,184	\$ 7.49	A
PC 57	33K+600 a 33K+675	Remontantes h<10m	486.72	\$ 146,184	\$ 7.63	A
PC 47	29K+400 a 29K+450	Remontantes h<10m	432.27	\$ 34,968	\$ 7.67	A
PC 78	47K+200 a 47K+250	Remontantes h<10m	432.27	\$ 34,968	\$ 7.70	A
PC 75	44K+500 a 44K+650	Flujos de tierra	330.37	\$ 200,864	\$ 7.91	A
PC 82	50K+900 a 51K+50	Flujos de tierra	330.37	\$ 200,864	\$ 8.11	B
PC 32	22K+320 a 22K+430	Remontante 10m<h<30m	297.97	\$ 1,190,928	\$ 9.30	B
PC 66	39K+0 a 39K+50	Remontantes h<10m	271.72	\$ 97,456	\$ 9.39	B
PC 69	40K+600 a 40K+650	Remontantes h<10m	271.72	\$ 97,456	\$ 9.49	B
PC 70	41K+100 a 41K+150	Remontantes h<10m	271.72	\$ 97,456	\$ 9.59	B
PC 77	47K+0 a 47K+50	Remontantes h<10m	271.72	\$ 97,456	\$ 9.69	B
PC 76	44K+700 a 44K+800	Remontante 10m<h<30m	237.03	\$ 957,687	\$ 10.65	B
PC 29	17K+740 a 17K+833	Reptación	183.22	\$ 100,644	\$ 10.75	B
PC 19	8K+340 a 8K+425	Remontante 10m<h<30m	173.79	\$ 814,034	\$ 11.56	B
PC 25	12K+250 a 12K+330	Remontante 10m<h<30m	170.60	\$ 866,130	\$ 12.43	B
PC 46	29K+0 a 29K+100	Flujos de tierra	165.28	\$ 133,910	\$ 12.56	B
PC 49	29K+600 a 29K+700	Flujos de tierra	165.28	\$ 133,910	\$ 12.69	B
PC 58	34K+200 a 34K+300	Flujos de tierra	165.28	\$ 133,910	\$ 12.83	B
PC 65	38K+100 a 38K+200	Flujos de tierra	165.28	\$ 133,910	\$ 12.96	B
PC 21	9K+700 a 9K+775	Remontante 10m<h<30m	152.73	\$ 811,997	\$ 13.77	B
PC 16	5K+600 a 5K+677.5	Remontante 10m<h<30m	145.84	\$ 742,208	\$ 14.52	B
PC 3	1K+70 a 1K+95	Remontantes h<10m	143.48	\$ 17,484	\$ 14.53	B
PC 50	29K+800 a 29K+825	Remontantes h<10m	143.48	\$ 17,484	\$ 14.55	B
PC 63	36K+100 a 36K+125	Remontantes h<10m	143.48	\$ 17,484	\$ 14.57	B
PC 20	9K+500 a 9K+575	Remontante 10m<h<30m	137.06	\$ 718,265	\$ 15.29	B
PC 26	12K+800 a 12K+870	Remontante 10m<h<30m	135.83	\$ 757,863	\$ 16.04	B
PC 15	4K+750 a 4K+810	Remontante 10m<h<30m	104.91	\$ 649,597	\$ 16.69	B
PC 27	14K+750 a 14K+815	Reptación	103.63	\$ 70,343	\$ 16.76	B
PC 53	31K+0 a 31K+75	Flujos de tierra	103.52	\$ 100,432	\$ 16.86	B
PC 68	40K+500 a 40K+575	Flujos de tierra	103.52	\$ 100,432	\$ 16.97	B
PC 83	51K+250 a 51K+325	Flujos de tierra	103.52	\$ 100,432	\$ 17.07	B
PC 30	19K+0 a 19K+57.5	Remontante 10m<h<30m	97.78	\$ 622,531	\$ 17.69	B
PC 7	2K+630 a 2K+692.5	Remontante 10m<h<30m	97.27	\$ 598,554	\$ 18.29	B
PC 39	27K+700 a 27K+750	Reptación	69.81	\$ 54,110	\$ 18.34	B
PC 42	28K+200 a 28K+250	Reptación	69.81	\$ 54,110	\$ 18.39	B
PC 43	28K+300 a 28K+350	Reptación	69.81	\$ 54,110	\$ 18.45	B
PC 48	29K+500 a 29K+550	Reptación	69.81	\$ 54,110	\$ 18.50	B
PC 14	4K+300 a 4K+346	Remontante 10m<h<30m	68.09	\$ 498,025	\$ 19.00	B
PC 28	17K+220 a 17K+267.5	Reptación	64.81	\$ 51,404	\$ 19.05	B
PC 34	26K+300 a 26K+350	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 19.12	B
PC 41	28K+0 a 28K+50	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 19.19	B

Trazado propuesto en 2019						
PC	Abscisado	Tipo deslizamiento	E/C	Costo Intervención (US\$)	Costo Acumulado (US\$ Millones)	Grupo de Intervención
PC 44	28K+700 a 28K+750	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 19.25	B
PC 45	28K+800 a 28K+850	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 19.32	B
PC 51	30K+0 a 30K+50	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 19.39	B
PC 71	41K+300 a 41K+350	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 19.45	B
PC 72	41K+400 a 41K+450	Flujos de tierra	55.61	\$ 66,955	\$ 19.52	B
PC 4	1K+470 a 1K+515	Remontante 10m<h<30m	52.96	\$ 430,959	\$ 19.95	B
PC 22	10K+400 a 10K+445	Remontante 10m<h<30m	52.96	\$ 430,959	\$ 20.38	B
PC 12	3K+720 a 3K+757.5	Remontante 10m<h<30m	49.41	\$ 405,998	\$ 20.79	B
PC 10	3K+100 a 3K+142.5	Remontante 10m<h<30m	47.72	\$ 407,017	\$ 21.20	B
PC 2	0K+210 a 0K+250	Remontante 10m<h<30m	42.75	\$ 383,075	\$ 21.58	B
PC 18	7K+830 a 7K+870	Remontante 10m<h<30m	42.75	\$ 383,075	\$ 21.96	B
PC 24	11K+680 a 11K+720	Remontante 10m<h<30m	42.75	\$ 383,075	\$ 22.35	B
PC 6	1K+900 a 1K+910	Remontantes h<10m	41.24	\$ 6,994	\$ 22.35	B
PC 9	3K+0 a 3K+37.5	Remontante 10m<h<30m	38.06	\$ 359,133	\$ 22.71	C
PC 35	26K+750 a 26K+787.5	Flujos de tierra	36.87	\$ 50,216	\$ 22.76	C
PC 36	26K+787.5 a 26K+825	Flujos de tierra	36.87	\$ 50,216	\$ 22.81	C
PC 5	2K+70 a 2K+105	Remontante 10m<h<30m	33.63	\$ 335,191	\$ 23.15	C
PC 13	3K+900 a 3K+935	Remontante 10m<h<30m	33.63	\$ 335,191	\$ 23.48	C
PC 23	11K+220 a 11K+255	Remontante 10m<h<30m	33.63	\$ 335,191	\$ 23.82	C
PC 11	3K+300 a 3K+332.5	Remontante 10m<h<30m	29.48	\$ 311,248	\$ 24.13	C
PC 38	27K+550 a 27K+575	Reptación	27.19	\$ 27,055	\$ 24.16	C
PC 40	27K+800 a 27K+825	Reptación	27.19	\$ 27,055	\$ 24.18	C
PC 17	6K+300 a 6K+327.5	Remontante 10m<h<30m	21.99	\$ 263,364	\$ 24.45	C
PC 1	0K+0 a 0K+25	Remontante 10m<h<30m	18.65	\$ 239,422	\$ 24.69	C

A partir de los resultados anteriores se recomienda que se incluya en el proyecto la reserva presupuestal para mitigar al menos los puntos clasificados como A y B, lo cual equivale a US\$ 23.7 millones para el trazado propuesto en 2012 y US\$ 22.3 millones para el trazado propuesto en 2019.

Vale la pena resaltar que las medidas de mitigación propuesta no buscan reducir el riesgo a cero, puesto que sería inviable técnica y financieramente. Para gestionar el riesgo residual (o aceptable) existen diferentes estrategias como la transferencia del riesgo o la gestión de emergencias. Un paso fundamental para la gestión de emergencias es contar con un sistema de alerta temprana, lo cual se considera una medida no estructural. En el Anexo 2 se puede encontrar más información de este tipo de sistemas y de su aplicación en el presente proyecto.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados anteriormente es posible concluir lo siguiente:

1. Los dos trazados para el Eje Vial No. 4 el propuesto en 2012 y el propuesto por el MTOP en 2019 están sujetos a un **alto riesgo por inestabilidad del terreno y deslizamientos** los cuales pueden ser detonados por lluvias intensas y/o por eventos sísmicos.
2. Con base en los recorridos de campo, la interpretación de fotografías aéreas y el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos se han identificado un total de 81 y 83 puntos críticos en los trazados propuestos del 2012 y 2019 respectivamente, en los cuales pueden ocurrir eventos que generen cierre parcial o total de la vía en caso de lluvias intensas y/o sismo.
3. Con base en los análisis de susceptibilidad a inundaciones y a crecientes torrenciales se concluye que no hay zonas de alta susceptibilidad a inundaciones por tránsito de crecientes y acumulación de agua en zonas de baja pendiente, aunque si hay al menos 9 puntos con alta susceptibilidad a descargas torrenciales en ambos trazados. Estos eventos pueden igualmente bloquear la vía por la acumulación de escombros y residuos y generar interrupción del tránsito.
4. En las condiciones esperadas para la vía sin la construcción de obras de mitigación, el riesgo por inestabilidad del terreno debido a lluvias intensas se representa en la vía por un volumen esperado anual de material deslizado del orden de los 70,000 m³, unas pérdidas directas esperadas por costos de remoción de escombros y afectaciones en la vía en el orden de los US\$ 2.0 millones anuales y unas pérdidas indirectas esperadas en el orden de los US\$ 9.2 millones anuales debidas a los costos asociados al tiempo de interrupción del tránsito en la vía. Estos valores resultan ligeramente mayores para el tramo propuesto del 2012 con respecto al 2019 (en un 10 - 30%) y aumentan sensiblemente (un 5 - 10%) al considerar el eventual impacto del cambio climático.
5. En las mismas condiciones descritas anteriormente, la pérdida máxima probable para un periodo de retorno de 50 años resulta en el orden de los US\$ 25 millones.

6. Un escenario sísmico correspondientes a un sismo con $M_w = 6.23$ que pudiese ocurrir en la zona de Benioff a unos 20 km de distancia de la zona de estudio y que tendría un periodo de retorno en el orden de los 250 años, generarían una situación catastrófica en la vía desde el punto de vista de estabilidad, más aún si este ocurriera en época de lluvias intensas. Para este escenario crítico, resulta inviable la adopción de medidas de mitigación de tipo estructural por lo cual para estas situaciones se recurre a un esquema de protección financiera adecuada (aseguramiento catastrófico del tramo vial) y la adopción de sistema de alerta temprana (SAT) y un plan de atención de emergencias (PAE).
7. Para efectos de mitigar el riesgo por inestabilidad y deslizamientos ante lluvias intensas, se plantean una serie de obras de mitigación que incluyen medidas verdes y grises como alternativas. Las intervenciones propuestas se valoran en unos US\$ 24 millones de dólares si se da prioridad a las obras verdes en comparación con unos US\$ 26 millones si se da prioridad a las medidas grises en el trazado propuesto en 2019. La opción de obras verdes, aunque de menores costos esperados, tendrían a su vez menor confiabilidad y mayores costos de mantenimiento que las obras grises.
8. El análisis de beneficio costo se lleva a cabo considerando beneficios directos e indirectos y costos de mantenimiento. Los resultados indican que las propuestas de intervención generan una relación B/C del orden de 3 principalmente debido a los altos costos indirectos que se generan en este tipo de eventos y que están asociados al tiempo de interrupción del tránsito.
9. Los análisis de eficiencia-costo permiten establecer una priorización de las obras de mitigación en función de aquellas que generan mayor impacto en la vía. A partir de esta priorización se recomienda realizar una reserva presupuestal en el proyecto del orden US\$ 22 millones con el fin de mitigar las zonas más críticas (grupos A y B) para el trazado propuesto en 2019.
10. El análisis de cambio climático ante los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 presentan resultados similares indicando que en general la amenaza de lluvia tiende a aumentar ligeramente y el riesgo de deslizamiento tendría igualmente una tendencia creciente. Las relaciones B/C por otro lado tienden a presentar un aumento de alrededor del 10% por el impacto de cambio climático al pasar de 3.0 a 3.5.

11. El Sistema de Alerta Temprana propuesto presenta énfasis en las zonas críticas identificadas mediante un sistema de toma de recopilación de información en tiempo real. Este sistema sería el fundamento de un plan de atención de emergencias que sería necesario implementar en el tramo vial, especialmente para la ocurrencia de una temporada larga de lluvias intensas que genere zonas de inestabilidad y/o deslizamientos, descargas torrenciales en los cauces que cruzan la vía o la ocurrencia de un evento sísmico que genere alta intensidad de aceleración del terreno en la zona de influencia del proyecto.

5.2 RECOMENDACIONES

Así mismo, se tienen las siguientes recomendaciones y propuestas para trabajos futuros complementarios:

1. Los análisis de susceptibilidad a la inestabilidad del terreno, deslizamientos y descargas torrenciales deben evaluarse de manera más detallada mediante estudios que incluyan topografía, geología, geotécnica, hidrología, hidráulica e ingeniería estructural para desarrollar la fase de diseño de obras de estabilización y control de descargas en los sitios críticos identificados y seleccionados para realizar intervenciones.
2. Los puntos críticos identificados, los procesos erosivos que se desarrollan y las características geológicas, geotécnicas e hidráulicas deben ser validados en campo por el Contratista diseñador de la vía, con el fin de incluirlos en la fase de diseños.
3. Las medidas de estabilización propuestas deben ser verificadas, revisadas y diseñadas por el Contratista diseñador de la vía.
4. Los costos unitarios y cantidades de obras que se presentan en este informe corresponden a valores tentativos preliminares cuyo propósito es la cuantificación general del riesgo y de los beneficios esperados de las obras propuestas y la toma de decisiones en una fase de prefactibilidad. Esta información debe ser validada y modificada a partir del diseño detallado de cada una de las medidas propuestas.
5. Se recomienda llevar a cabo un estudio con mayor nivel de detalle para la eventual implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) y un Plan de Atención de Emergencias (PAE) basado en las evaluaciones de riesgo realizadas. Igualmente se

recomienda el estudio y adopción de medidas de protección financiera en caso de desastre mediante un esquema de aseguramiento catastrófico.

6. REFERENCIAS

- Aristizábal, E., Gamboa, M. F., & Leoz, F. J. (2010). SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR MOVIMIENTOS EN MASA INDUCIDOS POR LLUVIA PARA EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA. *EIA Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 155-169.
- Bajabaa, S., Masoud, M., & Al-Amri, N. (2014). Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia). *Arabian Journal of Geosciences*, 7(6), 2469-2481.
- BID. (2003). *Natural Disaster Management and the Road Network in Ecuador: Policy Issues and Recommendations*. Washington : IFM Publications.
- BID-AECOM. (2019). *Estudio de Resiliencia Para La Red Vial Estatal Del Ecuador*.
- BID-ITEC. (2021). *Perfil de Riesgo Sísmico del Ecuador*.
- CAN. (2015). *Tráfico de carga internacional por carretera de Ecuador con Países de la Comunidad Andina*.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project . (2016). *CMIP5 - Data Access - Availability*.
- Corporación OSSO, LA RED & UNISDR. (2019). *Desinventar*. Obtenido de Sistema de Inventario de Efectos de Desastres: <https://www.desinventar.org/es/>
- Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Dahmen, E. R., & Hall, a. M. (1990). *Screening of hydrological data: tests for stationarity and relative consistency*. ILRI International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Farhan, Y., & Ayed, A. (2017). Assessment of Flash-Flood Hazard in Arid Watersheds of Jordan. *Journal of Geographic Information System*, 717-751.
- Germanwatch. (2019). *GLOBAL CLIMATE RISK INDEX 2020*. Berlin: Germanwatch e.V. .
- Goodwin , P. (2004). THE ECONOMIC COSTS OF ROAD TRAFFIC CONGESTION. *ESRC Transport Studies Unit - University College London*.
- Granás, K., & Jorgensen, F. (2017). Valuing the risk and social costs of road traffic accidents – Seasonal variation and the significance of delay costs. *Transport Policy*, 10-19.

- Grubbs, F. E. (1969). Procedures for detecting outlying observations in samples. *Technometrics*, 11(1), 1-21.
- Hidalgo, C. A., & Vega, J. A. (2014). ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR SISMOS Y LLUVIA (VALLE DE ABURRÁ-COLOMBIA). *Revista EIA*, 103-117.
- Hurtado, Á., & Yamin, L. (2018). *User Manual Software Landslide Tool*. Bogotá.
- INAMHI. (2015). *Determinación de Ecuaciones para el Cálculo de Intensidades Máximas de Precipitación*. Quito.
- Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., & Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 124-136.
- Lumb, P. (1975). SLOPE FAILURES IN HONG KONG. *Journal Engineering and Geology*, 31-65.
- Mahmood, S., & Rahman, A.-u. (2019). Flash flood susceptibility modeling using geomorphometric and hydrological approaches in Panjkora Basin, Eastern Hindu Kush, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*.
- Mazerolle, M. J. (2004). Making sense out of Akaike's Information Criterion (AIC): its use and interpretation in model selection and inference from ecological data. En *Mouvements et reproduction des amphibiens en tourbières perturbées* (págs. 174-190). Québec.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería . (2003). *Mapa de Órdenes de Suelos del Ecuador*. Quito.
- Montenegro, K. (2015). *COSTO DEL SERVICIO DE TRANSPORTE DE MERCADERÍA POR KM DE RECORRIDO PARA LA EMPRESA AGENCOMEX S.A.* Quito: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
- Myatt, G., & Johnson, W. P. (2014). *Making Sense of Data I* (Segunda ed.). New Jersey: Wiley.
- NCHRP. (2001). *Economic Implications of Congestion*. Washington D.C.: Transport Research Board.
- Rickli, C. (2009). Effects of forests on shallow landslides - Case studies in Switzerland. *Forest Snow and Landscape Research*.

- Ruiter, A. (2012). *Delta-change approach for CMIP5 GCMs*. De Bilt: Royal Netherlands Meteorological Institute.
- Schweikert, D. G. (1986). An Interpolation Curve Using a Spline in Tension. *Journal of Mathematics and Physics*.
- UNISDR. (2009). *2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva: United Nations.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists* (Novenia ed.). Boston: Prentice Hall.
- Watanabe, S. &. (2011). MIROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development Discussions*. , 4. 10.5194/gmdd-4-1063-2011. .
- Yamin, L., Ghesquiere, F., Cardona, O. D., & Ordaz, M. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastres*. Bogotá: Banco Mundial.

7. ANEXO 1 – INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS

















8. ANEXO 2 – MEDIDAS NO ESTRUCTURALES - SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Dentro de las opciones de medidas no estructurales, en el presente proyecto se evalúa de manera preliminar la factibilidad de implementar un Sistema de Alerta Temprana (SAT) contra eventos que puedan afectar el cierre de la vía y/o la seguridad de los usuarios que transitan por la misma. Los SAT corresponden a declaraciones que hacen los gobiernos con el fin de activar un conjunto de procedimientos preestablecidos tanto por las instituciones como por la población para responder a una probable emergencia generada por la ocurrencia inminente de un evento desastroso (Yamin, Ghesquiere, Cardona, & Ordaz, 2013). De acuerdo con definiciones de las Naciones Unidas, los SAT corresponden a: *“The set of capacities needed to generate and disseminate timely and meaningful warning information to enable individuals, communities and organizations threatened by a hazard to prepare and to act appropriately and in sufficient time to reduce the possibility of harm or loss.”* (UNISDR, 2009).

Teniendo esto en cuenta, es necesario establecer diferentes niveles de alerta, en la Tabla 38 se presentan los niveles más comunes encontrados en la literatura.

Tabla 38. Niveles de alerta en un SAT (adaptado de Aristizábal et al (2010))

Verde	Amarillo	Naranja	Rojo
Estado sin alteración	Estado de preparación (boletín)	Estado de disposición (aviso)	Estado de atención (alerta – cierre temporal de la vía)

Los principales componentes de un sistema de alerta temprana (Intrieri, Gigli, Mugnai, & Casagli, 2012):

1. **Monitoreo permanente:** Pluviómetros distribuidos en el trazado de la vía
2. **Análisis y previsión:** Modelo de susceptibilidad al deslizamiento, umbrales máximos de lluvias para cerramiento de vía. Sistema de funcionamiento y actualización permanente.
3. **Sistema de advertencia:** Advertencia a la comunidad mediante alerta físicas y virtuales. Cerramiento de vía a partir de umbrales predefinidos
4. **Respuesta al desastre:** Atención al desastre, atención a la comunidad, remoción de escombros, reapertura de la vía.

Para este SAT es necesario la instalación de pluviómetros en la vía con el fin de controlar las precipitaciones acumuladas para diferentes periodos de tiempo con mayor precisión y así asegurar el buen funcionamiento del sistema. La distribución de pluviómetros propuesta está basada en los resultados obtenidos en los análisis anteriores y puede ser identificada en la Figura 95.

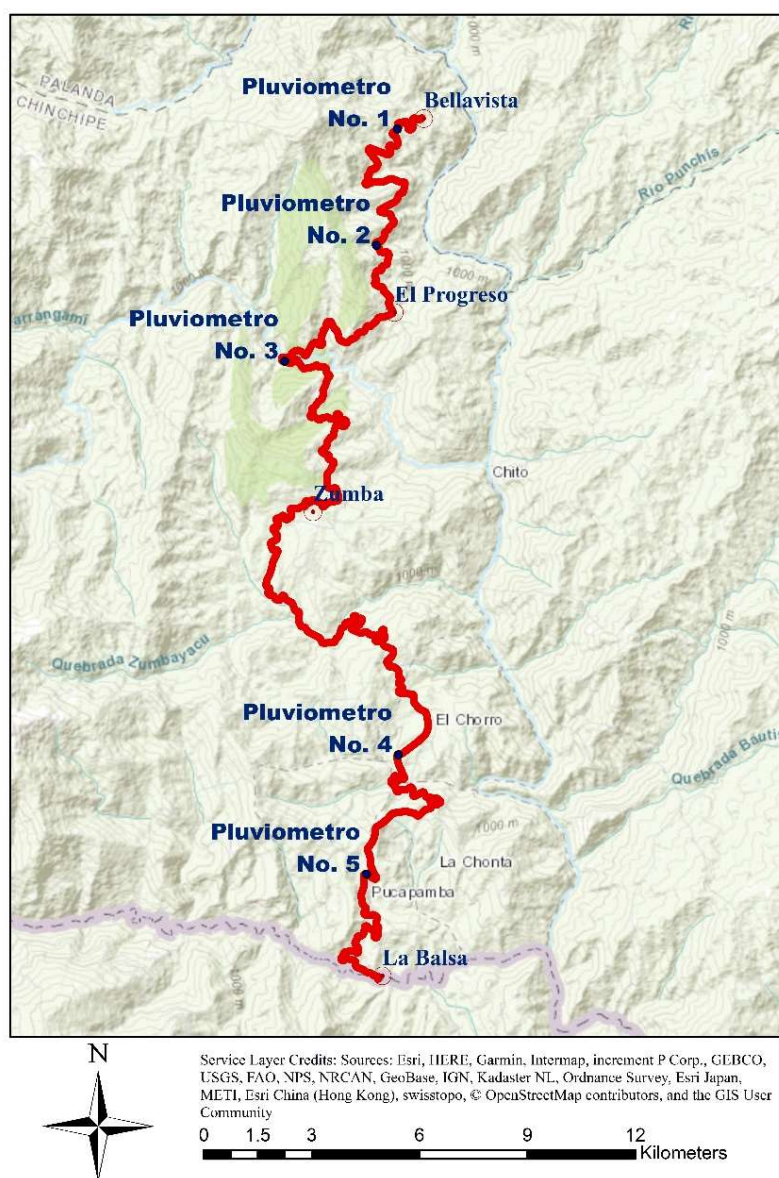


Figura 95. Ubicación de pluviómetros en el trazado propuesto en 2019

En el caso particular de este proyecto, sólo se cuenta con la precipitación acumulada mensual histórica, por esta razón, en primer lugar, se definen unos límites de precipitaciones

de esta variable para establecer el tipo de alerta. Estos límites se presentan en la Tabla 39. Vale la pena aclarar que una vez se tenga información nueva información de precipitaciones a un mejor nivel, diaria e incluso horaria, es necesario ajustar estos límites e incluir variables adicionales como la precipitación acumulada los 3 días anteriores o las últimas horas.

Tabla 39. Límites de precipitación acumulada

Nivel de Precipitación acumulada últimos 30 días	Nivel Alarma
<50	Verde
>50 & <200	Amarilla
>200 & <350	Naranja
>350	Roja (Cierre temporal de la vía)

Como indicamos anteriormente, el algoritmo de análisis del sistema en principio estará basado en la precipitación acumulada mensual, pero deberá ser ajustado para incluir nuevos parámetros con el fin de reducir la incertidumbre y mejorar la precisión de los modelos. El algoritmo propuesto se presenta en la Figura 96. Se recomienda la administración y supervisión del sistema de alerta temprana mediante convenios de diferentes entidades nacionales como el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, el Servicio Nacional de Gestión del Riesgo y Emergencias, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología y el ECU911.

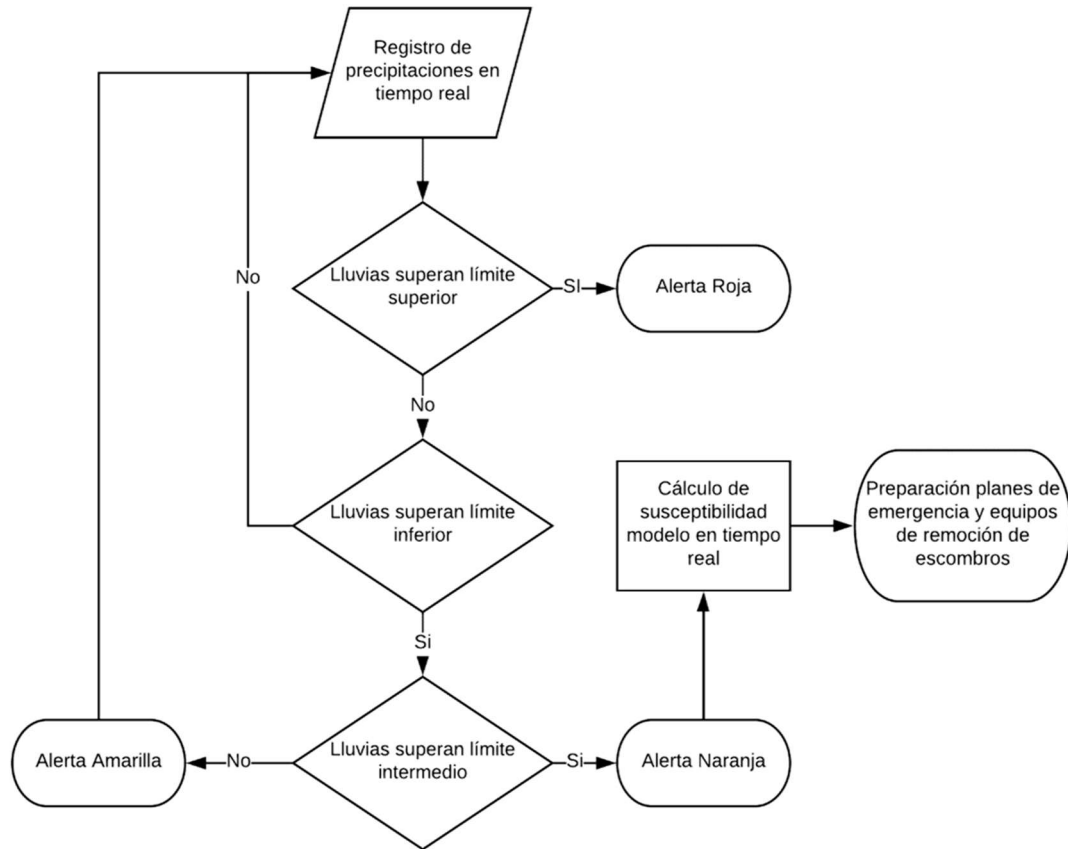


Figura 96. Algoritmo de procesamiento en tiempo real del SAT