

ANÁLISIS DE RIESGO CLIMÁTICO PARA EL SECTOR TRANSPORTE, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MODELO DE IMPACTOS BIOFÍSICOS Y ESCENARIOS PLAUSIBLES

Borbor-Cordova Mercy, Moreno Maria E, Caiza-Quinga Rommel, Iñiguez Jose, Muñoz Luis, Salazar Maria E, Valdiviezo-Ajila Angel

¹Ecuambiente Consulting Group Cia. Ltda

Noviembre, 2022

Resumen

El sector de transporte y vías es fundamental para las actividades de una sociedad, el gobierno, la industria y de los ciudadanos. Pero los eventos climáticos extremos como tormentas intensas, heladas, inundaciones, y deslizamientos afectan a la conectividad, la infraestructura de la red vial, y la seguridad vial del Ecuador. Para analizar los impactos del cambio climático en el subsector transporte se desarrollaron 3 componentes: I) Análisis climático histórico (1985-2015) considerando periodos de retorno (Tr) y tendencias climáticas que permiten evaluar las amenazas pasadas y futuras, II) Modelación hidrológica (HEC-HMS) y modelado hidráulico (HEC-RAS) para generar información hidrológica y mapas de inundación en diferentes escenarios climáticos; III) Método Heurístico de Combinación de Mapas de Factores Ponderados para obtener mapas de susceptibilidad a deslizamientos. Se identificaron sitios priorizados en la infraestructura de la red vial primaria y sus potenciales impactos en la infraestructura, basados en las tendencias históricas y en los años tipo para el periodo 2020-2050. Los años tipo (AT) corresponden a cinco escenarios climáticos definidos para Ecuador en el marco del PLANACC. Se encontró que la zona de la costa está más expuesta a impactos de inundación, mientras que los deslizamientos están preferentemente en la zona interandina y cordillera oriental y occidental. Siendo crítico realizar un análisis de vulnerabilidad al subsector Transporte. Se recomienda pasar de un enfoque de respuesta al de prevención y reducción de riesgo climático a través de un mayor conocimiento de la amenaza, exposición y la aplicación de modelos de impactos biofísicos que se generan importante información y umbrales para la toma de decisiones.

Abstract

The transport and road sector is fundamental for the activities of a society, the government, industries, and citizens. But extreme weather events such as intense storms, frosts, floods, and landslides affect connectivity, the infrastructure of the road network, and road safety in Ecuador. To analyze the impacts of climate change on the transport subsector, 3 components were developed: I) Historical climate analysis (1985-2015) considering return periods (Tr) and climate trends that allow evaluating past and future threats, II) Hydrological modeling (HEC-HMS) and hydraulic modeling (HEC-RAS) to generate hydrological information and flood maps in different climate scenarios; III) Heuristic Method of Combining Weighted Factor Maps to obtain landslide susceptibility maps. Priority sites were identified on the infrastructure of the primary road network and their potential impacts on the infrastructure, based on historical trends and type years for the period 2020-2050. The type years (AT) correspond to five climate scenarios defined for Ecuador in the frame of the PLANACC. We found that coastal zone is more exposed to flood impacts, whereas landslides are preferably in the inter-Andean zone and eastern and western mountain ranges. It is critical to carry out a vulnerability analysis together with the biophysical impacts. It is necessary to move from a focus on response to prevention and reduction of climate risk, through a better knowledge of exposure and application of models of biophysical impacts that generate important information and thresholds for decision-making.

Palabras Clave: Impacto biofísico, transporte, cambio climático, inundación, deslizamiento, HEC HMS, HEC RAS, Heuristic Model System

1. Introducción

El sector de transporte y vías es fundamental para las actividades de una sociedad, el gobierno, la industria y de los ciudadanos. Pero los eventos climáticos extremos como tormentas intensas, heladas, inundaciones, y deslizamientos afectan a la conectividad, la infraestructura de la red vial, y la seguridad vial de un país (EU CIRCLE Project, 2018). Globalmente, proyectos como el ROAD-ADAPT han reconocido la importancia de entender los riesgos climáticos en el sistema vial y de desarrollar estrategias para la adaptación al cambio climático de

este sector estratégico (Bles et al., 2015). El cambio climático está provocando que temperaturas extremas, vientos, incendios, sequías e inundaciones rápidas aumenten globalmente en intensidad y frecuencia (Forzieri et al., 2018, IPCC, 2021), lo que genera potenciales impactos en la infraestructura física del sistema vial (Ej: Figura 1). Por lo cual, es necesario asegurar la resiliencia de la infraestructura del sector transporte, la conectividad del país y la seguridad de la población. Ecuador, a través del Ministerio de Agua y Ambiente y Transición Ecológica (MAATE) reconoce la urgencia de preparar a este sector estratégico ante la amenaza del cambio

climático, y como parte del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PLANACC) se ha desarrollado el análisis de los riesgos e impactos climáticos para el sector de Transporte y vías primarias presentado en este reporte.

El enfoque aplicado para el análisis de los riesgos climáticos denominados de nivel 3, considera la aplicación de modelos hidrológicos, hidráulicos, y de susceptibilidad de deslizamientos para determinar sitios priorizados por el potencial impacto en la infraestructura de la Red Primaria. Se desarrollaron 3 componentes: **I)** Análisis climático histórico (1985-2015) considerando periodos de retorno (T_r) y tendencias climáticas que permiten evaluar las amenazas pasadas y futuras, **II)** Modelación hidrológica usando el “Hydrologic Engineering Center’s Hydrologic Modeling System” (HEC-HMS) y modelado hidráulico aplicando “Hydrologic Engineering Center’s River Analysis System” (HEC-RAS) para generar información hidrológica y mapas de inundación en diferentes escenarios climáticos y T_r ; **III)** Método Heurístico de Combinación de Mapas de Factores Ponderados para obtener mapas de susceptibilidad a deslizamientos ([Carrara et al., 1995](#); [Gómez, 2013](#); [INGEMMET \(2013\)](#); [PMA: GCA \(2007\)](#); [GEMMA, 2007](#)).

El objetivo del análisis de riesgos climáticos es que se identifiquen sitios priorizados en la infraestructura de la red vial primaria y escenarios plausibles de eventos climáticos con potenciales impactos en la infraestructura, basados en las tendencias históricas y en los años típicos para el periodo 2020-2050. Los años tipo (AT) corresponden a cinco escenarios climáticos para Ecuador del estudio de clima futuro, desarrollado en el marco del PLANACC ([CMC-INT, 2021](#)).

El HEC HMS y HEC RAS son modelos hidrológico e hidráulico más usados exhaustivamente, estos modelos computacionales creados por USACE (United States Army Corps of Engineers) por sus siglas en inglés. El HEC HMS está diseñado para simular procesos mediante relación precipitación-escorrentía referente a una cuenca hidrográfica transformando sus características intrínsecas en flujos de crecidas de agua ([Hydrologic Engineering Center, 2022b, 2022a](#); [Knebl et al., 2005](#)). HEC RAS está diseñado para realizar cálculos unidimensionales para canales naturales y artificiales, mediante las características del

canal y caudales se genera simulaciones de inundación ([Castro & Maidment, 2020b](#)).

Ambos modelos, en contexto de variabilidad climática, permiten estimar el impacto en diferentes magnitudes a la infraestructura vial. Por ejemplo, se puede analizar el impacto sobre los proyectos de urbanización alrededor de un río, durante un proceso de tormenta, las crecidas de agua en los canales fluviales son críticos como resultado del aumento de escorrentía por la degradación del suelo ([Adeyemi & Fashae, 2018](#)). La simulación de una inundación permite identificar sectores expuestos a diferentes niveles de amenaza, se tiene como mayor amenaza las áreas inundadas con mayor profundidad y con diferentes velocidades en las planicies ([Quirogaa et al., 2016](#)). Existen varios estudios aplicados del riesgo de daños a carreteras por inundación, determinando en qué condiciones se deteriora el pavimento en diversas estructuras de transporte en un sitio determinado, potenciados por el aumento de probabilidad de ocurrencia de tormentas severas e inundaciones ([Aranguren, 2019](#)).

2. Materiales y Métodos

El marco metodológico aplicado considera varios pasos del proceso para llegar a determinar los sitios críticos de los riesgos, tanto en el escenario presente basado en datos históricos (1985-2015), y en escenarios futuros considerando años tipo identificados como patrones plausibles para el periodo 2020-2050. Los pasos desarrollados en este proceso incluyeron:

- Paso 1. Pre-priorización de sitios a modelar.
- Paso 2. Modelación de sitios pre-priorizados.
- Paso 3. Talleres (3) de validación y retroalimentación de sitios modelados con actores del sector
- Paso 4. Análisis de impactos biofísicos en sitios priorizados en escenarios para varios periodos de retorno y años tipo representativos para el 2020-2050.

Los pasos integran procesos cuantitativos y cualitativos, que incluyen modelación de inundaciones, susceptibilidad a deslizamientos, inventario de eventos de inundación y deslizamientos ocurridos, así como el proceso de validación con los actores y expertos del sector del transporte.

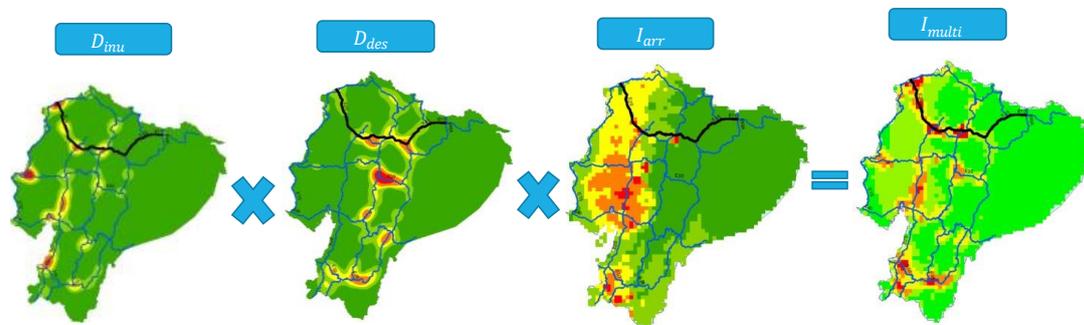


Figura 1 Inundaciones en las carreteras de la costa y deslizamientos en zonas hacia la cordillera.

Datos Observados		Evidencia de Eventos
Probabilidad de ocurrencia •Períodos de retorno en la serie histórica de precipitación anuales acumuladas (1985-2015)	Intensidad de precipitación •Análisis de precipitación extrema diaria del periodo histórico (1985-2015). •Anomalías de precipitación diaria asociado a severidad del impacto	Eventos Adversos •Eventos de inundaciones (2010-2021) •Eventos de deslizamientos (2010-2021)

Figura 2. Criterios de priorización para identificar eventos climáticos que han generado impactos en la infraestructura de los sectores estratégicos I) Datos Observados y II) Evidencia de Eventos Climáticos

Procedimiento para la generación de los escenarios de priorización.



$$I_{multi} = D_{inu} (cat: 1 - 5) \times D_{des} (cat: 1 - 5) \times I_{arr} (cat: 1 - 5)$$

- I_{arr} = anomalías precipitación
- D_{inu} = Densidad inundación
- D_{des} = Densidad deslizamiento

Figura 3. Diagrama del procedimiento para la selección de sitios priorizados; algebra de mapas que integra mapa de sitios de inundaciones, sitios de deslizamientos y un mapa de anomalías de precipitación, produciendo un mapa integrador con los sitios priorizados por amenazas múltiples.

2.1. Pre-priorización de sitios a modelar

El objetivo de este paso fue identificar los sitios donde se han producido eventos climáticos que han impactado a la infraestructura de vías primarias y donde se realizó subsecuentemente la modelación de

los impactos biofísicos. En la Figura 2., se muestra los criterios aplicados en la pre-priorización que incluyen los datos observados y la evidencia de eventos climáticos adversos.

Se usaron los datos de precipitación del periodo histórico 1985-2015 (PLANACC, 2021) y se determinó

la probabilidad de ocurrencia de eventos de alto impacto, asociados a un periodo de retorno (T_r) y a la intensidad de los eventos, identificando los años con precipitaciones extremas y los sitios donde ocurrieron a lo largo del sistema de vías primarias. Se calcularon las anomalías de precipitación, que corresponde a la variación del evento extremo respecto al promedio de las precipitaciones de todo el periodo 1985-2015. Por otro lado, se mapearon los eventos adversos de inundaciones y deslizamiento del periodo 2010-2020 que determinan sitios expuestos y el real impacto de la amenaza climática. La base de datos de eventos adversos proviene del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE). En la [figura 3](#) se muestra el procedimiento para operar todos los mapas en un proceso multiplicativo de álgebra de mapas (Booleana), los cuales fueron categorizados de 1 a 5, siendo 5 el valor más alto asignado a las máximas precipitaciones y mayor número de eventos adversos.

2.2. Área de Estudio del Sistema de Vías Primarias (Troncales y Transversales)

Las vías primarias, o corredores arteriales, comprenden rutas que conectan cruces de frontera, puertos, y capitales de provincia que forman una malla estratégica. En total existen 12 vías primarias en Ecuador con aproximadamente un 66% de la longitud total de la Red Vial Estatal. Las vías primarias reciben, además de un nombre propio, un código compuesto por la letra E, un numeral de uno a tres dígitos. La [Tabla 1](#) presenta los tramos priorizados para el análisis, su nombre, ubicación, la longitud del tramo a modelar y el tipo de amenaza al que se encuentra expuesto. La [Figura 4](#) ubica los tramos priorizados junto a las vías primarias en un mapa de ubicación para el territorio nacional.

Una vía primaria es considerada una *troncal* si tiene dirección norte-sur, son enumeradas con dos dígitos e impar. Las troncales se numeran incrementalmente desde el oeste hacia el este. Del mismo modo, una vía primaria es catalogada como *transversal* si se extiende en sentido este-oeste. Las vías primarias transversales cruzan zonas bajas de llanuras de inundación de ríos de la vertiente del Pacífico, cruzan la cordillera en un terreno con topografía con pendientes medias y altas, llegando al callejón interandino, y finalmente descendiendo a las cuencas del Amazonas que son zonas de alta precipitación y ríos de caudales importantes. Los tramos de la [Figura 4](#) se priorizaron

según el registro histórico de eventos de inundaciones y deslizamientos.

2.3. Análisis de las amenazas climáticas

La metodología aplicada para el análisis de las amenazas climáticas es a través de índices climáticos que permitan identificar sitios críticos por intensidad de precipitación o por frecuencia de eventos considerados extremos. Los índices climáticos aplicados son: a) Anomalías de precipitación, que representa la diferencia que existe entre un evento de precipitación en una zona específica con respecto al promedio histórico de los 31 años analizados, en el mismo sector, b) Número de días con precipitaciones sobre el percentil 95%, que indica el número de eventos extremos ocurridos en un sector específico en cada año; y c) Precipitación acumulada anual para el periodo 1985-2015. Adicionalmente, se consideran las d) Tendencias de incremento de la precipitación para el periodo 1985-2015 y la tendencia del número de días con precipitación sobre el percentil 95%. Los índices fueron aplicados a los datos diarios en formato ráster de 10 km de resolución para todo el Ecuador.

El cálculo de las anomalías de precipitación se lo obtuvo restando la precipitación diaria en cada píxel de la grilla menos la precipitación promedio de los datos diarios del periodo histórico. ([CIIFEN \(2022\)](#), [Guzman et al., \(2019\)](#), [Guachami et al., \(2013\)](#), [Mormeneo et al., \(2003\)](#), [González & Buitrago, 2012](#)).

Ecuación 1: precipitación promedio.

$$\overline{RR}_{i,j} = \frac{\sum_{t_0=1}^{t_f=11322} rr_{i,j}[t]}{11322}$$

Donde: $\overline{RR}_{i,j}$ es la precipitación promedio de todo el país en cada píxel de la grilla i, j [mm/día]

t_0 y t_f son el primer y último día del periodo histórico [días/año]

$rr_{i,j}$ es la precipitación diaria del periodo histórico en cada píxel de la grilla i, j [mm/día]

Ecuación 2: Cálculo de las anomalías

$$arr_{i,j} = \frac{\sum_{t_0=1}^{t_f=11322} (RR_{i,j}[t] - \overline{RR}_{i,j})}{11322}$$

Donde: $arr_{i,j}$ es la anomalía promedio en cada píxel de la grilla i, j [mm/año]

t_0 y t_f son el primer y último día del periodo 1985 – 2015 [días/año]

$RR_{i,j}[t]$ es la precipitación diaria en cada píxel de la grilla i, j [mm/día]

$\overline{RR}_{i,j}$ es la precipitación promedio en cada píxel de la grilla i, j [mm/día]

Los cálculos se realizaron usando el lenguaje de programación R, y los resultados fueron llevados a formato ráster para ser presentados en un Sistema de Información Geográfica.

Tabla 1 Sitios priorizados para la modelación hidrológica y de susceptibilidad de deslizamientos.

Nombre	Código	Nombre Vía	Provincia	Longitud km	Tipo
E10	V1	El Limonal	Imbabura	50.14	Deslizamiento
E15	V2	San Lorenzo	Manabí	10.73	Deslizamiento
E15	V3	Rocafuerte	Manabí	32.32	Deslizamiento
E20-15	V4	San Mateo	Esmeraldas	102.18	Inundaciones
E20-35	V5	Tandapi	Pichincha	106.60	Deslizamiento
E20-45	V6	Cosanga	Napo	72.04	Deslizamiento
E25	V7	San Miguel de los Bancos	Sto. Domingo T	62.14	Deslizamiento
E25	V8	Alfredo Baquerizo Moreno (Babahoyo)	Los Ríos/Guayas	40.61	Inundación
E25	V9	Churute	Guayas	33.72	Inundación
E25	V10	Camilo Ponce (Tenguel)	El Oro	42.98	Inundación
E25	V11	La Victoria	El Oro/Loja	69.94	Deslizamiento
E30	V12	Portoviejo	Guayas	260.00	Deslizamiento
E30	V13	Mera	Pastaza/Tungurahua	67.05	Deslizamiento
E35	V14	San Pedro de Alausí	Chimborazo	47.23	Deslizamiento
E35	V15	Canguraca	Loja	31.61	Deslizamiento
E40	V16	Buena Fe	Guayas	172.20	Deslizamiento
E40	V17	Osayacu	Azuay	91.29	Deslizamiento
E45	V18	Lumbaqui	Napo	15.85	Inundaciones
E45	V19	El Reventador	El Chaco	76.79	Deslizamiento
E45	V20	Logroño	Morona-Santiago	68.77	Deslizamiento
E45	V21	El Rosario	Morona-Santiago	71.19	Deslizamiento
E45	V22	Yantzaza	Zamora Chinchipe	138.01	Deslizamiento
E45A	V23	Hollín	El Oro	18.71	Deslizamiento
E50	V24	Balsas	El Oro	87.85	Deslizamiento
E35-50	V25	Veracruz	Morona-Santiago	31.68	Deslizamiento
				1801.63	/6026.7

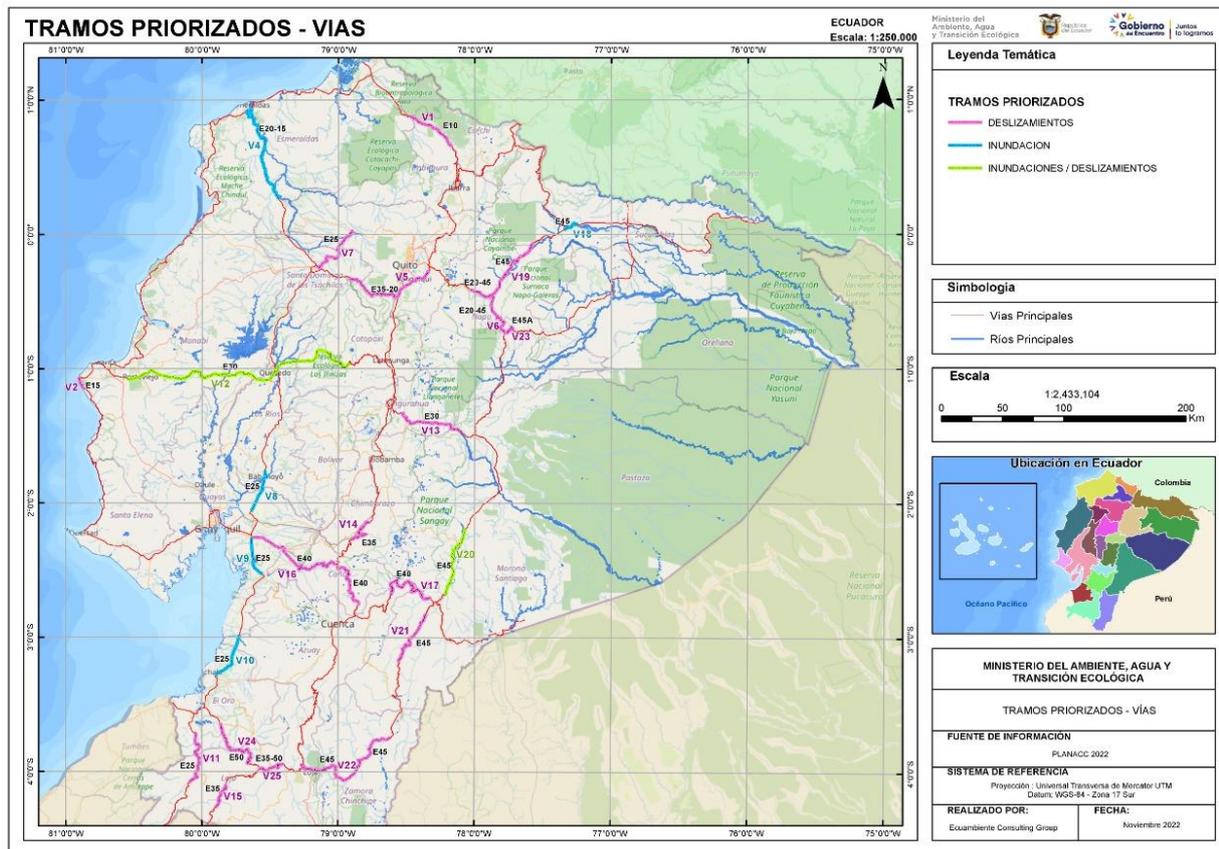


Figura 2 Los tramos priorizados de las Vías primarias para la modelación de impactos biofísicos, con una longitud de 1800 Km, que corresponde al 29% del Sistema de Vías Primarias de Ecuador

2.4. Modelación de sitios priorizados

En la figura 5 se muestra el diagrama del proceso de la modelación en los sitios priorizados; primero se aplicó la modelación hidrológica usando el HEC-HMS para calcular los caudales picos y escorrentías en diferentes periodos de retornos de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Luego, los resultados del modelo hidrológico se

utilizaron de entrada para la modelación hidráulica usando el HEC-RAS, que permite desarrollar mapas de inundaciones con niveles y velocidades para los diferentes periodos de retorno. Finalmente, se modelan los escenarios futuros en base a los años típicos obtenidos del reporte de Clima Futuro para el periodo 2020-2050 usando el mismo procedimiento que para los años históricos.

Diagrama de procesos de la modelación de inundaciones

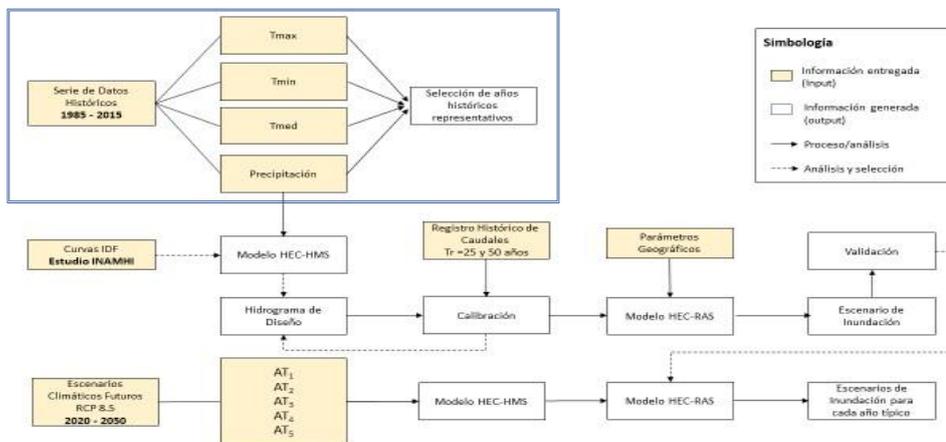


Figura 5. Diagrama de procesos de la modelación hidrológica (usando el HEC-HMS) y HEC-RAS para obtener escenarios de inundación en base a diferentes periodos de retorno y escenarios futuros en base a Años Típicos obtenidos a partir de los datos históricos.

2.5. Modelación hidrológica aplicando el HEC-HMS

Para determinar el impacto de las inundaciones en el Subsector Transporte se desarrollaron un modelo hidrológico y uno hidráulico. Para el modelo hidrológico se aplicó el HEC-HMS versión 4.10 que permite simular los procesos de transporte de agua en una cuenca determinada, a partir de la precipitación y en función de las condiciones biofísicas de la cuenca, como tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, rugosidad del suelo, pendiente, entre otras ([Castro & Maidment, 2020](#)). Los datos de entrada usados en el HEC-HMS se describen a continuación:

- Modelo de Elevación Digital, resolución de 12.5 m, obtenido del satélite ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Espacial. Los productos de este satélite pueden obtenerse por Alaska Satellite Facility en el siguiente enlace: <https://search.asf.alaska.edu>.
- Modelo de Elevación Digital, resolución de 5m, obtenido del proyecto SIGTIERRAS del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador (E45 Sector Lumbaqui0) y 3 m para la zona de Camilo Ponce (E25).
- Coeficiente del Número de Curva (NC), es un parámetro adimensional cuyos valores oscilan entre 0 y 100, siendo 100 la capacidad máxima de retención de la cuenca ([Carillo & Mejía, 2016](#)).
- Delimitación de las cuencas de estudio a lo largo de los tramos priorizados para inundaciones en las vías primarias.
- Intensidad de lluvia, a partir de las precipitaciones máximas para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Estos datos provienen del “Estudio de intensidades máximas de precipitación” del INAMHI ([INAMHI, 2019](#)).
- Tc tiempo de concentración, es el tiempo que requiere el escurrimiento en viajar desde el punto más alejado de la cuenca hasta su salida. Su cálculo depende principalmente de la pendiente y la longitud del cauce principal.
- La abstracción inicial; es un número adimensional, que representa la capacidad del suelo en retener agua antes de producirse la escorrentía directa, está asociada a los factores morfométricos y la humedad propia del tipo de suelo ([Prieto Villarroya et al., 2020](#)).
- Se combinó el modelo de la cuenca con el modelo meteorológico, determinado por la distribución diaria en bases a las curvas de Huff ([Dunkerley, 2022](#)) y de la precipitación máxima para los

periodos de retorno, considerando el método de diseño de tormenta (hietogramas) en base a la intensidad, duración y frecuencia de un evento de lluvia a partir de las curvas IDF generadas por el INMAHI ([INAMHI, 2019](#)).

Con estas condiciones se corre el modelo y se obtienen las simulaciones que determinan caudales máximos (Q_{max} , m^3/s) y escorrentía (mm^3). Se obtienen visualizaciones de los hidrogramas y una tabla resumen de las series de tiempo obtenidas. Para los escenarios plausibles se analizaron los periodos de retorno usados para el diseño de infraestructura (50 y 100 años) con las variaciones de cada año típico en su percentil 95th y la media ([Olaya et al., 2020](#)).

2.6. Modelación hidráulica aplicando el HEC – RAS (River Analysis System)

La modelación hidráulica se la realizó con el HEC – RAS (River Analysis System 6.2), un software que permite realizar cálculos hidráulicos y resuelve las ecuaciones de Saint Venant en una dimensión, de un flujo inestable unidimensional en función de las variables morfométricas de la cuenca, modelos digitales de terreno y la resistencia del flujo de agua en un “canal”. El modelo utiliza representaciones comunes de datos geométricos y rutinas de cálculos geométricos e hidráulicos comunes. La modelación incluye las siguientes fases:

- a) Recopilación de la Información necesaria para el modelamiento Hidráulico, estableciendo las características del lugar, la rugosidad del medio (Coeficiente de Manning). En este estudio se utilizaron imágenes del modelo digital de elevación (MDE) de ALOSPALSAR a una resolución 12.5 m y del proyecto SIGTIERRAS con una resolución de 5 m para la Amazonía.
- b) Fase de preprocesamiento – requiere aplicar QGIS para la determinación de las características de la cuenca, y mediante la extensión HEC-geoRAS se dibuja la geometría del cauce.
- c) Modelamiento del flujo inestable – Se introducen los parámetros de entrada para el modelo como los hidrogramas y los coeficientes de rugosidad del medio.
- d) Post-procesamiento. - Mediante el MDE, y la delimitación de la cuenca, se guarda las profundidades resultantes en formato .tif y se visualizan en Qgis para definir simbología y niveles.

2.7. Método de susceptibilidad a deslizamientos, aplicando un proceso Heurístico de Combinación de Mapas de Factores Ponderados (HCM)

El modelado de la susceptibilidad ante deslizamientos se realizó mediante los siguientes pasos: (1) descomposición del terreno en los factores que lo vuelven susceptible a deslizamientos. En este estudio se eligieron 12 de los 14 condicionantes de deslizamientos propuestos por Ozdemir (2020); (2) cada factor (Figura 6) se estandariza en una escala de 1 a 5 en función de su influencia (susceptibilidad) relativa en los deslizamientos. (3) la importancia relativa de cada clase de los factores se determina cuantitativamente a través de una comparación por pares de acuerdo con la escala fundamental de Saaty que se presenta en la tabla 2 y cuyos resultados de la matriz de ponderación de presenta a continuación:

Tabla 2 Escala fundamental para la comparación por pares.

Nivel de importancia	Descripción
1	Igual importancia
2	Débil
3	Moderada importancia
4	Moderadamente más importante
5	Fuerte importancia
6	Fuertemente más importante
7	Muy fuerte o importancia demostrada
8	Muy, muy fuerte
9	Extremadamente importante

(4) Luego, se calculan los pesos de cada clase sobre cada factor (Wi) con base en la metodología desarrollado por Thomas L. Saaty (1980) de acuerdo con la ecuación 3.

Ecuación 3:

$$W_i = \frac{\sum_j^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n$$

Finalmente, (5) El índice de susceptibilidad a deslizamientos (ISD) se calcula a través de la sumatoria de cada factor previamente multiplicado por su ponderación (Ecuación 4). Los pesos obtenidos de los factores condicionantes (Wj) y los pesos (wij) de las variables utilizadas se presentan en la Tabla 3. El mapa de susceptibilidad a deslizamiento (MSD) se establece de acuerdo con la Ec.4. Para el HCM realizada se calculó una taza crítica (CR) de 0.09, una relación que indica un nivel razonable de consistencia en la comparación por pares que fue lo suficientemente buena para reconocer los pesos de los factores.

Ecuación 4:

$$ISD = \sum_{i=1}^n (W_i \times R_i)$$

Tabla 3 Matriz de comparación por pares de los 12 factores utilizados para el cálculo del ISD. (P) Pendiente, (CP) Curvatura en planta, (Pf_C) curvatura de perfil, (STI) Transporte de sedimento, (SPI) Potencial de corriente, (TWI) Humedad topográfica, (DD) Densidad de drenaje, (Dis_D) Distancia a Drenaje, (Geo) Litología, (DF) Densidad de falla geológica, (Dis_F) Distancia a falla geológica, (US) Uso de suelo

	P	CP	Pf_C	STI	SPI	TWI	DD	Dis_D	Geo	DF	Dis_F	US	
P	1.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.00	7.00	3.00	9.00	8.00	3.00	
CP		1.00	1.00	0.20	0.25	0.25	2.00	2.00	0.13	2.00	2.00	0.13	
Pf_C			1.00	0.20	0.25	0.25	2.00	2.00	0.13	2.00	2.00	0.13	
STI				1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	0.20	3.00	3.00	0.14	
SPI					1.00	2.00	2.00	1.00	0.20	3.00	3.00	0.11	
TWI						1.00	2.00	1.00	0.20	5.00	5.00	0.33	
DD							1.00	1.00	0.33	2.00	2.00	0.33	
Dis_D								1.00	0.25	2.00	1.00	0.33	
Geo									1.00	7.00	5.00	2.00	
DF										1.00	0.50	0.20	
Dis_F											1.00	0.20	
US												5.00	1.00
Sum	2.8	41.0	41.0	25.6	27.2	22.4	26.0	24.5	6.3	43.0	37.5	7.9	

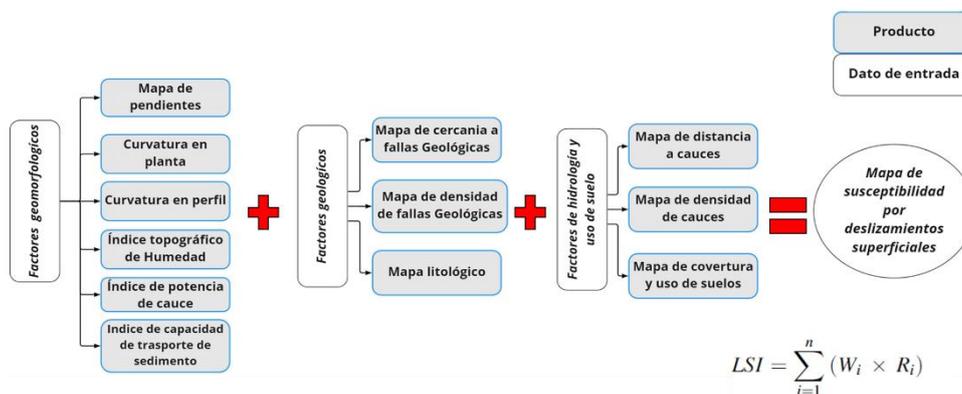


Figura 3 Diagrama de procesos con los factores utilizados para obtener el mapa de susceptibilidad antes deslizamientos superficiales.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados en 4 subsecciones: a) los patrones y tendencias de las amenazas climáticas considerando la precipitación y la temperatura máxima y mínima, analizando la información histórica y luego los cinco (5) escenarios futuros denominados Años Típicos (AT). Los AT son escenarios plausibles de un clima futuro del periodo 2020-2050 basados en el estudio realizado por Clima Futuro. La siguiente sección, muestra los 2) resultados del modelo hidrológico HMS e hidráulico, y 3) los resultados de la modelación hidráulica con los respectivos mapas de inundación para periodos de retorno y clima futuro. 4) Se presentan los resultados del modelo de susceptibilidad a deslizamientos.

3.1. Análisis de las Amenazas climáticas

Para el análisis de las Amenazas Climáticas se recurrió a índices que caracterizan las variables meteorológicas de forma espacial, de tal manera que se pueda apreciar el comportamiento de la precipitación y la temperatura en las diferentes vías y regiones del país. En esta sección se presentan los patrones espaciales de las anomalías y tendencias de precipitación, así como el de las temperaturas del periodo histórico 2015-2020 y escenario de los Años tipo 2020-2050.

Patrones y tendencias históricas de la precipitación y sus anomalías

El impacto de las precipitaciones en el sistema de vías primarias está relacionado con la intensidad de la tormenta diaria, la recurrencia de eventos extremos, pero también es importante considerar la precipitación acumulada durante varios días que puede saturar el suelo y ser un factor disparador de un deslizamiento. La [Figura 7](#) presenta los índices de precipitación seleccionados para el análisis del componente climático y la amenaza de la precipitación en las zonas de interés para el análisis de la red vial. Se observa de manera general que tanto la precipitación promedio histórica y la precipitación acumulada son congruentes, de manera que indica que la región con mayor cantidad de precipitación es la Amazonía, especialmente en la zona centro-norte. Esta región recibe una gran cantidad de precipitación durante el año, pero tiene a su vez una alta resiliencia a estos efectos por la cobertura vegetal. Las anomalías de

precipitación del primer trimestre brindan una noción estacional de la precipitación. En la región litoral se puede observar que gran parte de la precipitación (anomalías positivas) ocurren durante el primer trimestre del año, este es un comportamiento que no se asemeja al de las otras regiones, donde las anomalías son negativas y muestran una mayor dispersión de eventos extremos durante el año, con picos de precipitación menores a los de la región litoral. En términos del número de días con precipitaciones extremas (> 95%), se observa que los valores son similares sobre todo el territorio, con pequeñas zonas con mayor acentuación en la zona del callejón interandino.

En la [figura 8.](#), se muestran las tendencias de la precipitación en el periodo histórico, este análisis es de gran importancia para entender los sectores que han sido expuestos progresivamente a cantidades de precipitación mayores, o caso contrario, se ha visto una disminución. Se observa de forma general que las zonas con incrementos de precipitación tanto diaria, como acumulada, se ubican al norte de la región costa, en la zona del Chocó (Norte de Esmeraldas), el norte de la Amazonía y varias zonas de las estribaciones de cordillera oriental. Por el contrario, se observa que, en gran parte de la región interandina, las estribaciones de cordillera occidental y el centro sur de la región litoral, las tendencias son negativas, es decir que existe disminución en la cantidad de precipitación. Al comparar los mapas de cantidad de precipitación, con la tendencia del número de días con precipitaciones extremas (> 95p), se observan incrementos en la zona norte de la región litoral y las estribaciones occidentales, zonas puntuales del norte de la región interandina y el sur del país. En los casos donde la precipitación incrementa y los eventos extremos también (Ej: Esmeraldas), se puede inferir que la precipitación incrementa y junto a ella, los eventos extremos. En las zonas donde la precipitación disminuye y los eventos extremos incrementan (Ej: Pichincha), se puede inferir que los eventos extremos serán más frecuentes, pero que, la precipitación bajo el percentil 95 disminuye. Finalmente, en casos donde la cantidad de precipitación y la frecuencia disminuyen (Ej: Los Ríos), se esperarían condiciones más áridas. Se muestra también un ejemplo de las series de precipitación mensuales para dos de los tramos priorizados (V8 y V22), para poder observar la estacionalidad y los extremos.

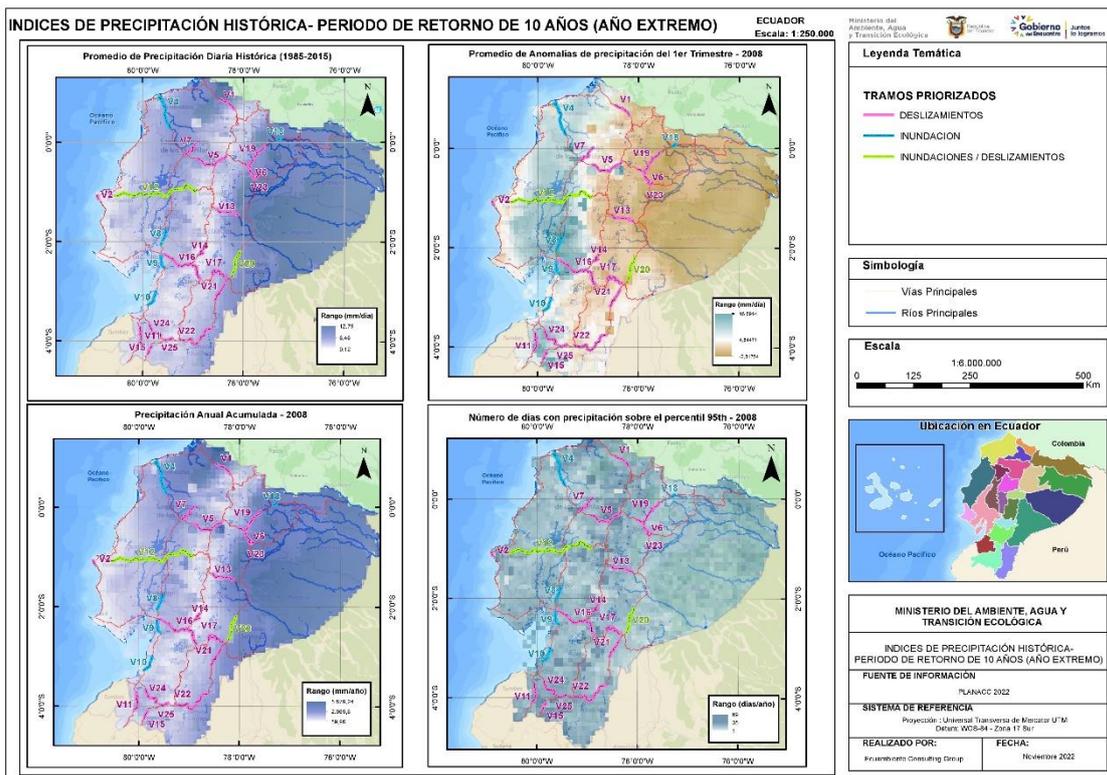


Figura 4 Indicadores climáticos de precipitación histórica a lo largo de las vías principales en el Ecuador: a) Precipitación promedio histórica (mm/día), b) Promedio de las anomalías de precipitación en mm/día para el primer trimestre de un año con un Tr de 10, y d) Número de días con precipitaciones sobre el percentil 95 en días/año para un Tr de 10 años.

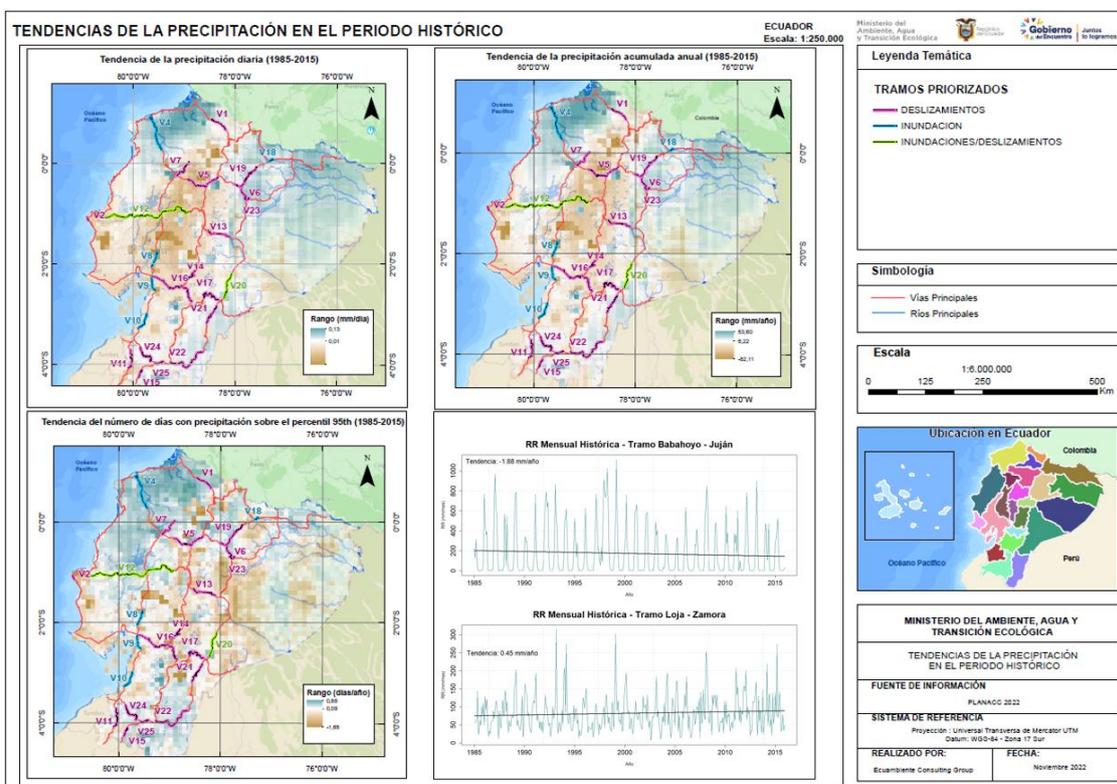


Figura 5 Tendencias de la precipitación en el periodo histórico: a) Tendencia de la precipitación diaria en mm/día, denota patrones diarios anuales de incremento en la cantidad de precipitación en las diferentes regiones, b) Tendencia de la precipitación acumulada en mm/año, c) Tendencia del número de días con precipitación sobre el percentil 95th en días/año, d) Series de precipitación mensual en las zonas priorizadas, Babahoyo-Juján (V8) y Loja-Zamora (V22), se observa el comportamiento estacional de la región costa con respecto a la interandina/amazónica

Análisis de patrones y tendencias de las temperaturas máximas y mínimas

El impacto de la temperatura máxima como mínima en las vías, tiene que ver con la resistencia de los materiales y su fatiga respecto a los procesos de expansión y compresión de la base y subbase de las vías. En el caso de temperaturas muy frías con presencia de hielo y nieve ya ha afectado a las vías, principalmente con paralización de su conectividad y con los procesos de limpieza requeridos después de las tormentas de nieve o hielo. En general, un análisis de los efectos de las temperaturas en la infraestructura no se ha estudiado a profundidad, por lo que no se tiene un registro histórico de afectaciones, por lo que la determinación del impacto en términos de temperaturas es difícil de caracterizar.

En la [Figura 9](#) se observa el percentil 90th de temperaturas máximas (Tmax) y el comportamiento que tiene este índice en años con características de precipitación diferentes (distintos periodos de

retorno). El análisis del percentil 90th de Tmax muestra un comportamiento típico de las temperaturas en el territorio nacional, con mayor incidencia de temperaturas altas en la región litoral, amazónica y focalizada en zonas del sur del país. Al relacionar el análisis del índice del número de días con temperaturas máximas extremas, con los periodos de retorno de precipitación (utilizados para la clasificación de los años históricos), se observa que la mayor recurrencia de temperaturas máximas extremas se da de forma generalizada a nivel nacional bajo un periodo de retorno de 5 años, el más bajo del análisis. Este comportamiento tiene congruencia, debido a que de manera general se podría inferir que, en años con menor precipitación, existe menor presencia de nubosidad, y, por lo tanto, mayores temperaturas máximas. La relación entre el comportamiento de la temperatura y la precipitación se vuelve una pieza clave para un análisis futuro con mayor detalle y con una base de datos que permita cuantificar o categorizar las afectaciones de las temperaturas máximas en las vías estatales.

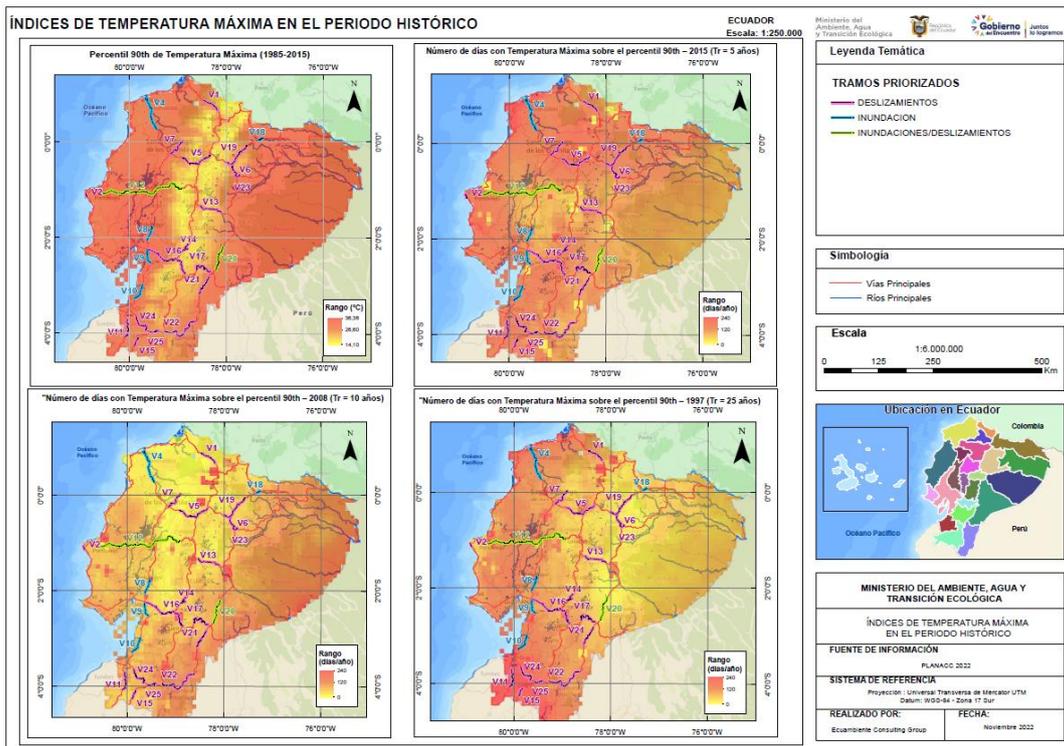


Figura 9. Índices de Temperatura Máxima en el periodo histórico: a) Percentil 90th de Temperatura Máxima, mapa referencial para comprender los valores de temperatura que se superan n veces en cada año, b) Número de días con temperaturas máximas sobre el percentil 90th para un Tr de 5 años, las Tmax extremas se produjeron de manera generalizada en el país, c) Número de días con temperaturas máximas sobre el percentil 90th para un Tr de 10 años, se aprecia una menor incidencia en la zona norte y centro de la costa y sierra, se aprecian puntos de color más intenso que pueden relacionarse a los focos de calor en las ciudades principales, d) Número de días con temperaturas máximas sobre el percentil 90th para un Tr de 25 años, la menor recurrencia de días extremos se produjo en el norte de la Amazonía con menor incidencia en las estribaciones orientales de cordillera, en este mapa también se aprecian los focos de calor de las ciudades principales.

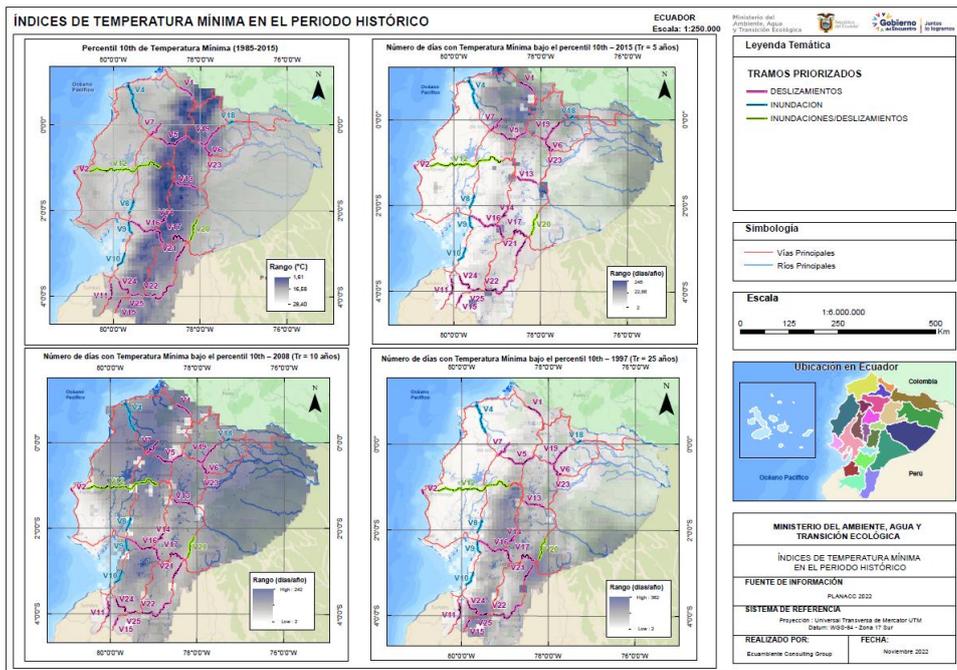


Figura 10. Índices de Temperatura Mínima en el periodo histórico: a) Percentil 10th de Temperatura Mínima, mapa referencial para comprender los valores de temperatura que disminuyen n veces en cada año, b) Número de días con temperaturas mínimas bajo el percentil 10th para un Tr de 5 años, las Tmin extremas se produjeron en el centro y sur de la región interandina y amazónica, c) Número de días con temperaturas mínimas bajo el percentil 10th para un Tr de 10 años, los eventos extremos de Tmin son generalizados en gran parte del país con menor recurrencia en el centro y sur de la región litoral, d) Número de días con temperaturas mínimas bajo el percentil 10th para un Tr de 25 años, la mayor recurrencia de días extremos se produjo en el norte de las tres regiones del territorio continental, con mayor incidencia en la zona del Chocó.

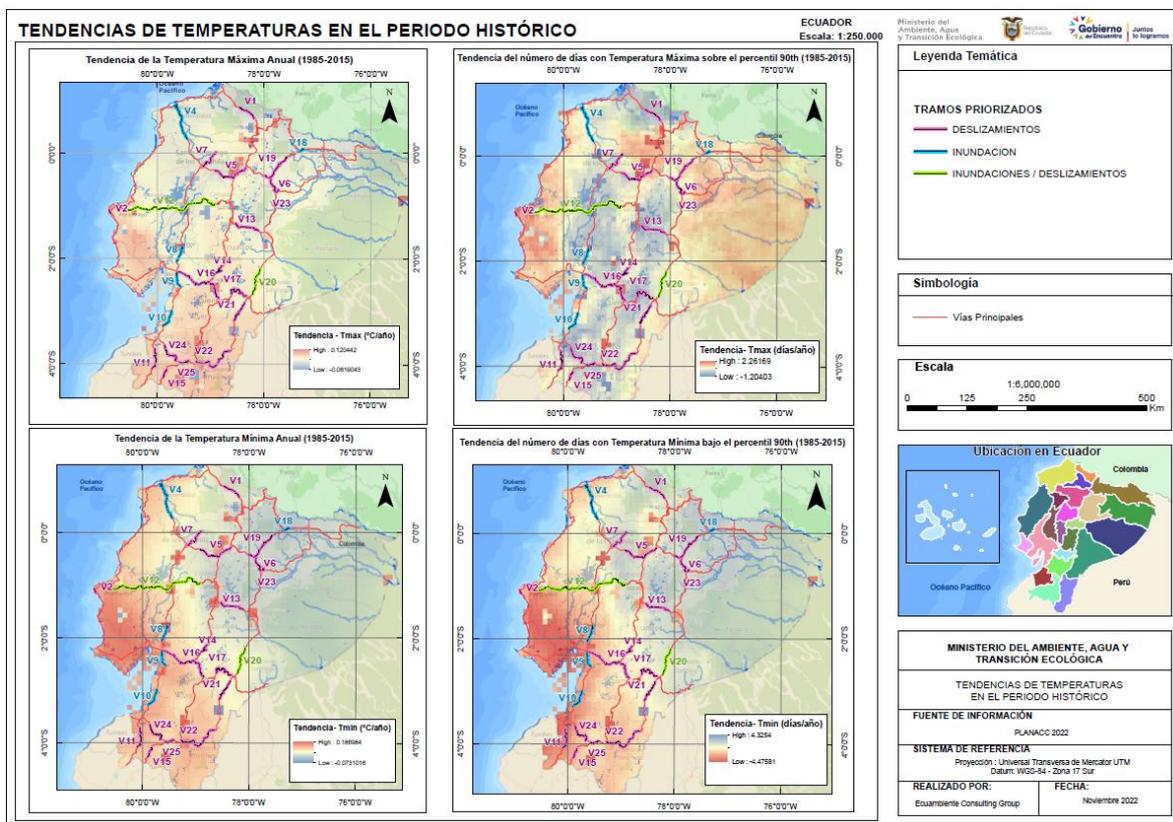


Figura 11. Tendencias de temperatura en el periodo histórico: a) Tendencia de la temperatura máxima anual, las zonas con mayor amenaza son el centro y sur del país, b) Tendencia del número de días con temperaturas máximas sobre el percentil 90th, los eventos extremos podrían incrementarse en la zona costera y gran parte de la Provincia de Pichincha y el centro norte de la Amazonía, c) Tendencia de la temperatura mínima anual, las zonas con descensos de temperatura más pronunciados se encuentran en el centro norte del callejón interandino y la

Amazonía, d) Tendencia del número de días con temperaturas mínimas bajo el percentil 10th, las tendencias indican un incremento en el número de días con temperaturas mínimas extremas en la zona centro y norte de la Amazonía y la región interandina, mientras que el litoral centro y el sur del país experimentarían una disminución de eventos de temperaturas mínimas extremas.

La [Figura 10](#) presenta el índice de Temperatura Mínima seleccionado para la caracterización de los años históricos. Se observa el percentil 10th de las temperaturas mínimas como referencial para comprender el umbral de temperaturas mínimas en todo el territorio, la distribución de temperaturas es consistente con la altura y el comportamiento de las regiones, siendo la región interandina la más susceptible a las temperaturas más bajas. El análisis de temperaturas mínimas según los periodos de retorno de precipitación no logra tener una relación notoria como se observó en la temperatura máxima, pues se observa que el año con la mayor incidencia de días bajo el percentil 10th es el 2008, correspondiente a un periodo de retorno de 10 años. La ocurrencia de eventos de temperaturas extremas tiene mayor relación a otros patrones de circulación regionales como los frentes de aire frío provenientes del sur del continente y los fenómenos de la niña. Se observa que los años con periodo de retorno 5 años donde los eventos más extremos ocurrieron al centro y sur de la región interandina y amazónica, y 25 años que presenta una mayor ocurrencia en la zona norte del país y varias zonas puntuales del callejón interandino. A futuro, para un análisis más profundo de la temperatura mínima y sus efectos, se tendría que buscar una relación la precipitación y la temperatura mínima, o buscar un patrón de comportamiento específico que pueda potenciar la ocurrencia de temperaturas mínimas extremas, como ocurrió en el año 2008. Adicionalmente, es notorio recordar los eventos de nevadas ocurridos en el sector de Papallacta, que recientemente han ocasionado cierres viales y problemas en la conectividad del país.

La [Figura 11](#) muestra las tendencias de temperaturas máximas, mínimas y del número de días con eventos extremos. Se puede observar que, con respecto a la temperatura máxima, las tendencias de precipitación y eventos extremos son positivas en la zona central de la región litoral, abarcando parte de las provincias de Manabí, Santa Elena y Guayas. En la zona sur del país, se puede observar una tendencia de incremento de temperaturas, pero disminución de número de eventos extremos en el año, este comportamiento nos indica que los días con Tmax extremos serán más intensos, pero menos recurrentes. Este comportamiento es contrario a lo que se observa al centro norte de la Amazonía, donde se aprecia que la

intensidad de los eventos extremos podría reducir, pero se volverían más frecuentes cada año. Sobre las tendencias de temperatura mínima se puede observar una gran congruencia entre las tendencias en la magnitud y la frecuencia de los eventos, de tal forma que se puede deducir que, en el centro y sur del litoral y el sur de la región interandina y amazónica, las temperaturas mínimas incrementan tanto en magnitud como en frecuencia, por lo que se esperan días más cálidos de manera general. En el caso del centro y norte del país, se puede observar que las temperaturas mínimas tienen una tendencia negativa, que nos indica que, en los próximos años, podrían experimentarse variaciones de temperatura más fuertes entre la máxima y la mínima. También, es importante notar que, en los mapas de tendencias de temperatura mínima es muy notorio el incremento de temperatura en zonas con alto crecimiento urbano que altera con mayor facilidad el comportamiento normal de las variables como la temperatura.

Tendencias de los años típicos (AT) escenarios 2020-2050

Los AT representan un escenario plausible de eventos climáticos futuros basados en la información histórica de los 31 años. [La Figura 12](#) muestra mapas de variación porcentual del percentil 95 en cada Año Tipo con respecto al percentil 95 del periodo histórico. El factor resulta de la división del percentil 95 de precipitación de cada AT, para el percentil 95 del periodo histórico, de esta forma se obtiene un valor numérico adimensional que puede ser utilizado para la multiplicación de los valores de precipitaciones máximas o del percentil 95 en los modelos de inundación y deslizamiento para comprender las variaciones de la precipitación extrema en los próximos años. Las variaciones entre los AT son ligeras, especialmente entre los AT 1, 2, 4 y 5. Todos los mapas tienen un valor superior a 1, lo que indica que, en los escenarios de los AT, los eventos de precipitación extrema tienden a incrementar. En los AT 1, 2, 4 y 5 se observa que las zonas de incrementos de precipitaciones más relevantes se ubican en el Callejón Interandino, que afecta directamente la extensión completa de la vía E35 y en la región costa, especialmente en el fijo costanero, por lo cual puede afectar a las vías E15, E40 y E25. La región Amazónica

no muestra variaciones significativas en el percentil 95, pero se debe tener en cuenta que esta zona recibe anualmente la mayor cantidad de precipitaciones

extremas, esto se puede notar claramente en el primer mapa del percentil 95 de precipitación.

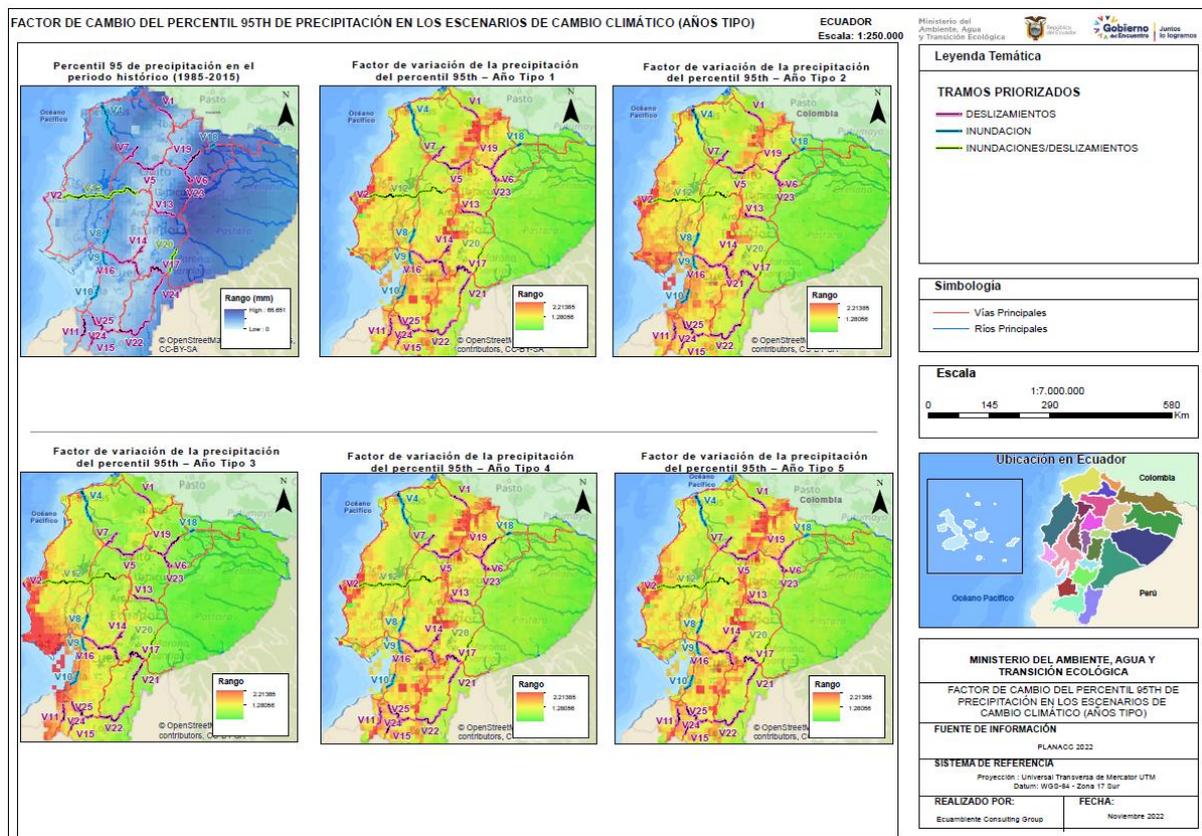


Figura 12. Factores de variación porcentual de los escenarios de cambio climático con respecto a la precipitación del percentil 95 histórico: a) Percentil 95 de precipitaciones históricas; b) Factor de variación del percentil 95 del AT1 con respecto al percentil 95 del periodo histórico, c) Factor AT2, d) Factor AT3, e) Factor AT4, f) Factor AT5.

3.2. Resultados Modelación Hidrológica

La modelación hidrológica permite relacionar los niveles de precipitación con los caudales máximos (Qmax) y los niveles de inundación en la zona de interés en escenarios de periodo de retorno histórico de 5,10, 25, 50 y 100 años. El análisis permite dividir los tramos de vías priorizadas en tres sectores de acuerdo con su ubicación geográfica. En la zona norte de Ecuador, ejemplificamos el sector San Mateo (E20-V4) y Lumbaqui (E45-V18), en la zona centro el sector de Alfredo Baquerizo Moreno (Babahoyo) (E25-V8) y la zona sur en el sector de Camilo Ponce (E25-V10).

Zona Norte de Ecuador (Vía Transversal)

En el sector norte se encontró que el sector E20-V4 tiene una mayor tendencia al aumento de precipitación (11% - 47%) que el sector E45-V18, con

un rango de 7%-38% para los diferentes periodos de retorno. Se evidencia que la cuenca de San Mateo-Quinindé tiene procesos de mayor intensidad de la precipitación e incremento del caudal del cauce principal en un 84% para un periodo de retorno de 100 años en relación al Tr de 5 años, esta zona presenta mayor variabilidad en los caudales obtenidos (del 12% al 22% entre periodos de retorno) comparado con la variación en los periodos de retorno del sector de Lumbaqui (7% - 11%).

Zona Centro y Sur de Ecuador (Vía Troncal)

En la zona central del Ecuador, la zona E25-V8 presenta una variabilidad en las precipitaciones o intensidades máximas de diseño de entre el 11% y 18%, estas variaciones han generado una variabilidad de entre el 23% y 49% de los caudales en la zona de análisis. Esta variabilidad está condicionada por las

características morfométricas de la cuenca y uso de suelo de la zona que puede evidenciarse en el aumento del factor curva número (65) propio de zonas dedicadas a la agricultura o con mayor porcentaje de área construida. Para la zona sur de Ecuador la variabilidad de la precipitación esta entre el 18% y 26% con una variabilidad de hasta el 56% en los caudales generados. Los resultados se presentan en la [Tabla 4](#) y su representación gráfica se muestra en la [Figura 13](#).

Se encontró que los caudales máximos tienen una mayor variabilidad en el sector de San Mateo, aumenta entre un 19% a 84% para periodos de retorno entre 10 y 100 años. Por lo tanto, la vía principal que se encuentra en la Cuenca del Esmeraldas estará más expuesta a eventos de mayor magnitud y con mayor frecuencia. Siendo relevante considerar los procesos

de cambio en el uso de suelo y cobertura vegetal. Otra de las zonas con mayor variabilidad en los caudales máximos se localiza en la zona centro y sur de Ecuador con aumentos de los caudales de entre el 45% y 300%, como en el sector de Camilo Ponce (Vía E25 -V10) ([Tabla 5](#)).

En el caso de Lumbaqui (E45 -V18), se presenta como una cuenca más pequeña con menores variaciones de caudales y escorrentías más bajas, estos datos sugieren que las condiciones de uso de suelo y cobertura vegetal mantiene más bajos los flujos de caudales y escorrentías en la cuenca. Sin embargo, mediante la consideración de los riesgos de deslizamientos hay que tener en cuenta los niveles de saturación de los suelos en función de las lluvias acumuladas y el tipo de suelo presente.

Tabla 4 Resultados del modelo hidrológico para la zona norte de Ecuador (San Mateo (E20) y Lumbaqui (E40)) estableciendo los caudales máximos (Qmax m3/s) en cada sitio priorizado para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

E45		Sector Cascales -Lumbaqui – long 65 km			
Tiempo de Concentración (min)		217		Código V18	
Curva Número (CN)		51			
Periodo de retorno	RR Max (mm/día)	% Cambio RR	Qmax (m3/s)	% Cambio Qmax	Escorrentía (mm)
5	88		733		3
10	94	7%	784	7%	4
25	104	11%	872	11%	9
50	112	8%	949	9%	14
100	121	8%	1040	10%	23

E20		Sector San Mateo -Quinindé - Long 102.18 km			
Tiempo de Concentración (min)		420		Código V4	
Curva NÚmero (CN)		63			
Periodo de retorno	RR Max (mm/día)	% Cambio RR	Qmax (m3/s)	% Cambio Qmax	Escorrentía (mm3)
5	131		1223		41
10	146	11%	1457	19%	53
25	165	13%	1779	22%	78
50	179	8%	2018	13%	82
100	193	8%	2256	12%	98

Tabla 5 Resultados del modelo hidrológico para la zona centro y sur de Ecuador (Alfredo Baquerizo Moreno (E25) y Camilo Ponce (E25)) estableciendo los caudales máximos (Qmax m3/s) en cada sitio priorizado para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

E25 Sector Alfredo Baquerizo Moreno - Babahoyo – Long 40.61 km					
Tiempo de Concentración (min)		283		Código V8	
Curva Número (CN)		65			
Periodo de retorno	RR Max (mm/día)	% Cambio RR	Qmax (m3/s)	% Cambio Qmax	Escorrentía (mm)
5	180		453		12.69
10	212	18%	677	49%	18.31
25	254	20%	999	47%	26.5
50	284	12%	1265	27%	33.25
100	315	11%	1552	23%	40.58

E25 Sector Camilo Ponce – Long: 42.98 km					
Tiempo de Concentración (min)		426			
Curva Número (CN)		58			
Periodo de retorno	RR Max (mm/día)	% Cambio RR	Qmax (m3/s)	% Cambio Qmax	Escorrentía (mm3)
5	121		48		-
10	144	19%	70	46%	-
25	182	26%	109	56%	-
50	216	18%	149	37%	-
100	258	19%	199	34%	-

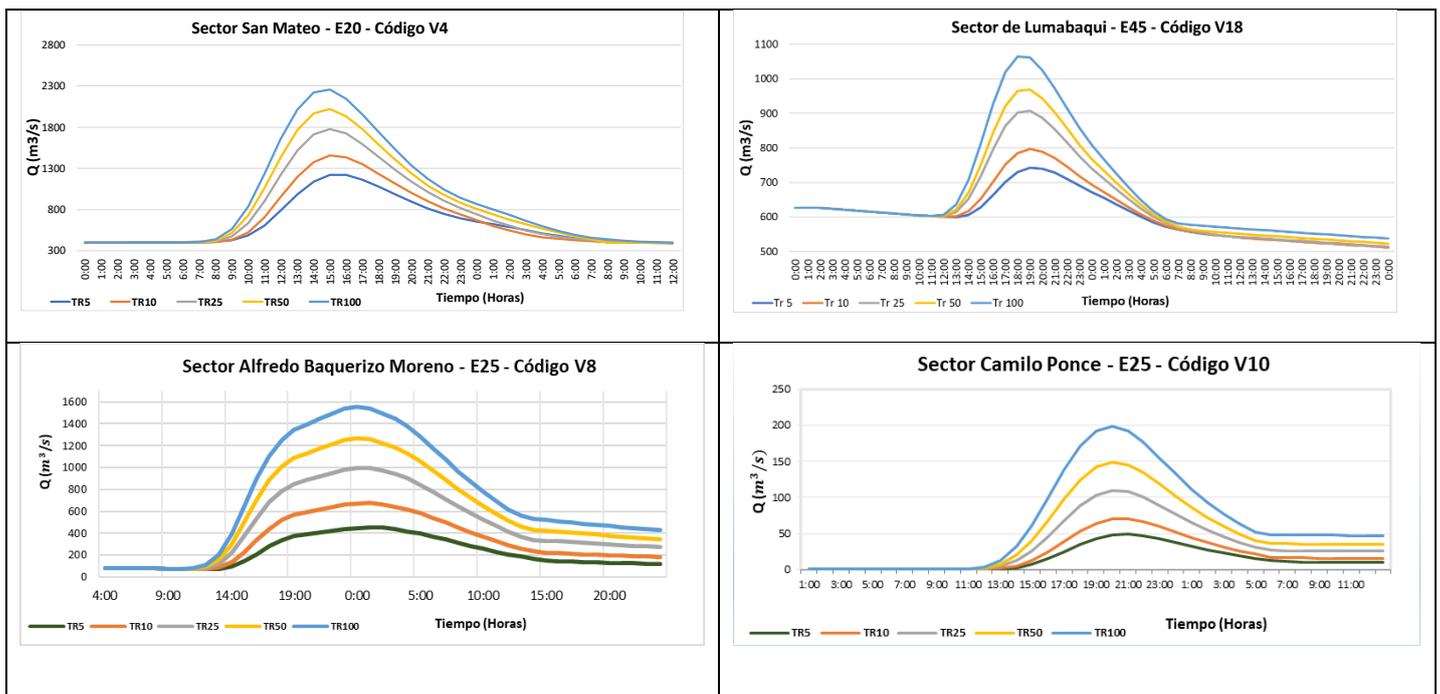


Figura 13 Caudales máximos en el sector de San Mateo (vía E20), Lumabaqui (vía E45), Alfredo Baquerizo Moreno (Babahoyo) (vía E25) y Camilo Ponce (vía E25) para diferentes periodos de retorno Tr: 5,10, 25, 50, 100 años.

Modelación Hidrológica en el contexto de los Años Típicos para periodo (2020-2050)

En forma similar se analizaron escenarios históricos en base a los periodos de retorno en el periodo 2020-2050, se analizaron los cinco AT propuestos como escenarios plausibles. Para cada Año Típico se comparó los escenarios de un evento histórico de 50 años, con variaciones que corresponden a un escenario de valores medios futuros con periodo de retorno de 50 años, el percentil 95th de 50 años, y otro escenario de periodo de retorno de 100 años y el 95th de los 100 años.

Zona Norte de Ecuador (Vía Transversal)

Se encontró que la cuenca costera del Quinindé se mantiene mucho más variable que la cuenca de la zona de Lumbaqui, y además con los diagramas del Boxplot (figura 14) se evidencia que el AT3 es el que tiene los valores más altos entre todas sus variaciones en la zona de Quinindé. Mientras que en la zona de Lumbaqui, todos los escenarios son bastante similares. Las variaciones en estos sectores se presentan en la [Tabla 6](#).

Zona Centro y Sur de Ecuador (Vía Troncal)

Los resultados en la zona centro y sur de Ecuador, determinan que, las variaciones entre años tipo para

la zona de Babahoyo es menor en relación con el sector de Camilo Ponce ([Tabla 7](#)). En el AT3 para el sector de Babahoyo de acuerdo con los resultados presentados en la [figura 14](#) se observa que el año tipo que tiende a las máximas, presenta una variabilidad de entre 8% y 9% para los escenarios relacionados con la media y el percentil 95. En el sector de Camilo Ponce la variabilidad es mayor con variaciones de entre el 13% y 14%.

De acuerdo con la [figura 14](#), los valores de Qmax para cada Año típico en relación con sus periodos de retorno de 50 y 100 años evidencia que la variabilidad entre escenarios que del percentil 95% para cada año típico son menores (barra amarilla) en comparación con los escenarios planteados para las medias (barra celeste) de cada año típico. De acuerdo con la caja de bigotes ([Figura 14b](#)) se evidencia que el AT3 es el escenario que presenta una mayor tendencia hacia los registros máximos, en la zona centro y sur de Ecuador (Babahoyo y Camilo Ponce) la variabilidad entre escenarios de los años tipo es mayo en relación con la zona norte de Ecuador (San Mateo y Lumbaqui) que mantienen una diferencia mínima en los distintitos escenarios.

Tabla 6 Qmax para las variaciones en la media y el percentil 95 de los años tipo para sus periodos de retorno de 50 y 100 años, en la zona norte de Ecuador (Lumbaqui – E45 y San Mateo – E20).

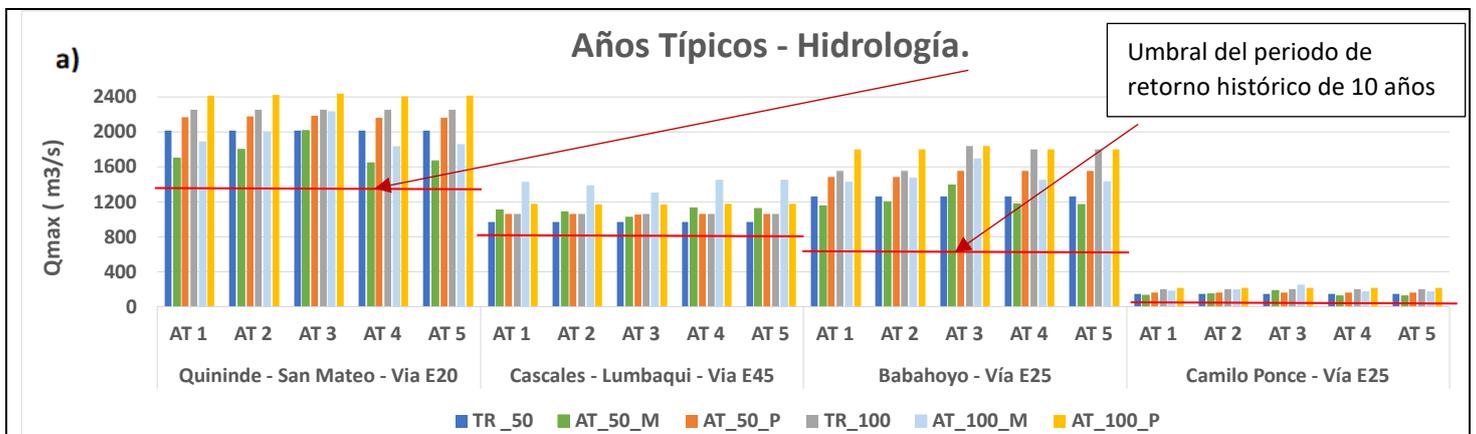
Qmax (m3/s) periodos de retorno	E45			Lumbaqui – Código V18	
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5
TR_50 histórico	969	969	969	969	969
AT_50_Medio	1110.31	1081.86	1020.04	1127.25	1122.42
AT_50_95%	1058.94	1057.99	1052.99	1061.79	1061.79
TR_100 años	1064.63	1064.63	1064.63	1064.63	1064.63
AT_100_M	1426.34	1386.8	1300.35	1449.3	1442.97
AT_100_95%	1174.28	1172.98	1166.52	1177.78	1177.78

Qmax (m3/s) periodos de retorno	E20		Quinindé - San Mateo – Código V4		
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5
TR_50 histórico	2017.7	2017.7	2017.7	2017.7	2017.7
AT_50_Medio	1697.60	1803.00	2012.40	1648.30	1673.10
AT_50_95%	2169	2174.9	2186.7	2162.6	2165.8
TR_100 años	2256.4	2256.4	2256.4	2256.4	2256.4
AT_100_M	1881.9	1999.2	2232.5	1828.2	1854.8
AT_100_95%	2419.3	2425.4	2438.1	2411.9	2415.8

Tabla 7 Qmax para las variaciones en la media y el percentil 95 de los años tipo para sus periodos de retorno de 50 y 100 años, en la zona norte de Ecuador (Alfredo Baquerizo Moreno – E25 y Camilo Ponce – E25).

Qmax (m3/s) periodos de retorno	E25		Baquerizo M- Babahoyo – Código V8		
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5
TR_50 histórico	1264.85	1264.85	1264.85	1264.85	1264.85
AT_50_Medio	1157.07	1199.57	1393.74	1179.13	1168.78
AT_50_95%	1481.58	1487.02	1519.22	1487.02	1484.56
TR_100 años	1551.63	1551.63	1551.63	1551.63	1551.63
AT_100_M	1419.72	1469.75	1696.04	1445.12	1433.36
AT_100_95%	1798.15	1804.45	1841.85	1804.45	1801.48

Qmax (m3/s) periodos de retorno	E25		Camilo Ponce – Código V10		
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5
TR_50 histórico	149.2	149.2	149.2	149.2	149.2
AT_50_Medio	129.9	143.8	186.7	123.6	125.6
AT_50_95%	158.9	159.7	162.3	158.5	158.6
TR_100 años	199.3	199.3	199.3	199.3	199.3
AT_100_M	175.2	192.5	246	167.2	169.8
AT_100_95%	211.5	212.5	215.7	211	211.1



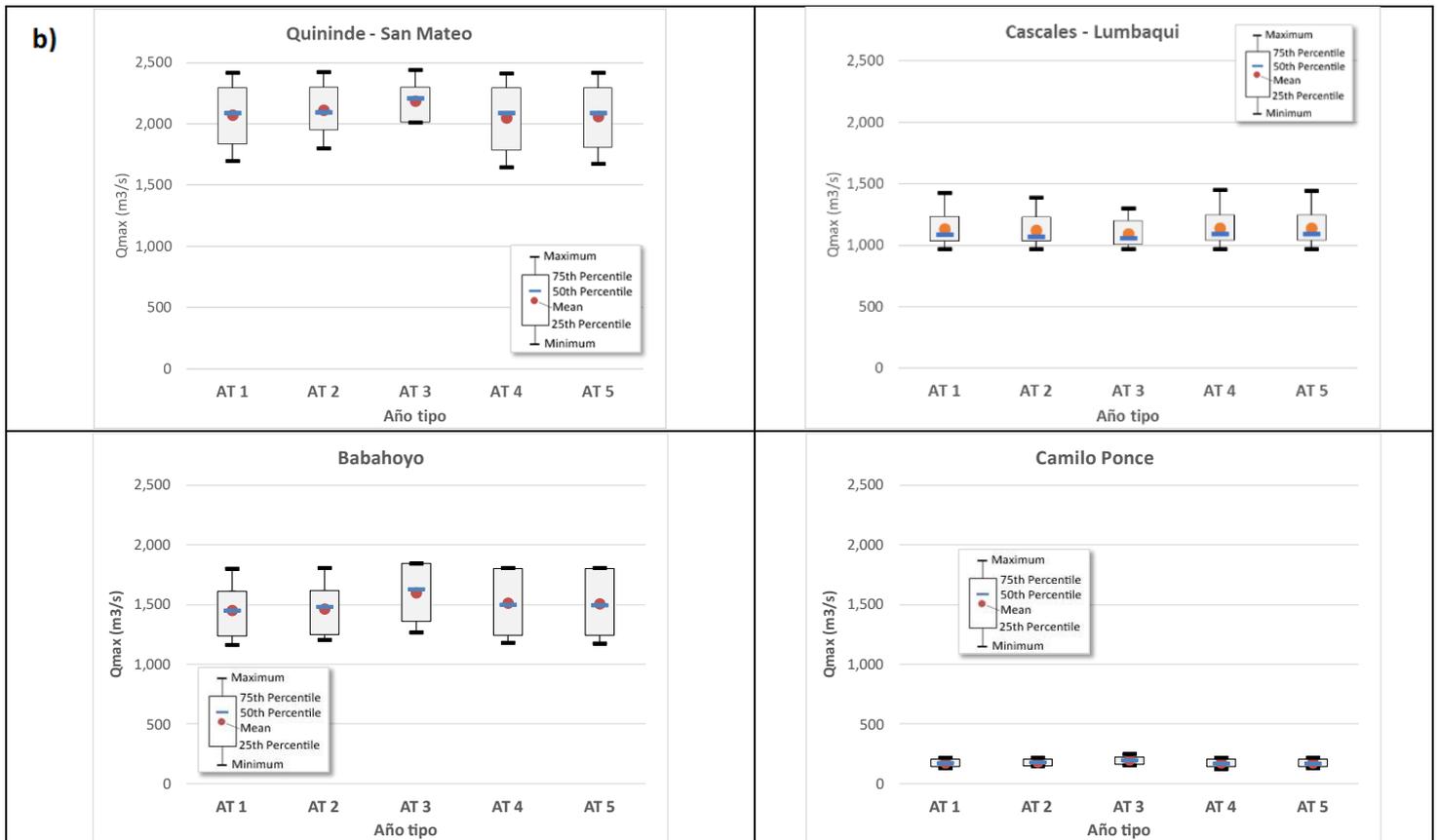


Figura 14. a) Qmax de las proyecciones realizadas a los TR de 50 y 100 años para cada Año Típico. La línea roja punteada representa el umbral del histórico de un periodo de retorno de 10 años. b) Diagrama boxplot de la proyección de los Años Típicos para los TR de 50 y 100 años.

3.3. Resultados de la modelación hidráulica para un escenario histórico y AT con periodos de retorno de 50 y 100 años.

El escenario del Año tipo AT3 es similar a los años históricos 1998, 2005, 2010, 2011, 2013 y 2014 con una probabilidad de ocurrencia del 19.35%. Usamos este año y sus periodos de retorno de 50 y 100 años, como escenarios plausibles de eventos futuros para el periodo 2020-2050. Dichos periodos de diseños son los que se recomiendan para estudios hidrológicos de cambio climático para el análisis de posibles impactos en la estructura de las carreteras. A continuación, se ejemplifican el tramo San Mateo en la vía E20, norte del país, y el sector de Babahoyo en la vía E25 en la parte central del país.

Zona Norte del Ecuador (Vía Transversal)

Los resultados obtenidos en la zona norte de Ecuador correspondiente a la zona de San Mateo presentan áreas de inundación de entre 0.5 y 1 que intersecan con la vía E25, los sectores críticos son: Tatica, Santa Rosa, La Treinta, Taquígue.

En la [figura 15](#) en el sector de Tatica (1) se presentan niveles de 1 m de inundación para los escenarios previstos. El área de inundación para zonas en el rango de 1 a 3m es de 0.87 km² con niveles de inundación de entre 1 a 3 m. El incremento del nivel entre los escenarios realizados para los años tipo es de aproximadamente 11% en relación con su periodo de retorno base. Las velocidades determinadas en esta zona no superan los 2m/s.

La clasificación del impacto está en función del nivel de agua y velocidad del cauce de acuerdo con la siguiente [tabla 8](#):

Tabla 8 Clasificación de Impacto por Nivel del Agua y Velocidad del Cauce

Nivel del Agua (m)		
Rango mínimo	Rango Máximo	Impacto
0	0.25	Muy Bajo
0.25	0.5	Bajo
0.5	0.75	Medio
0.75	1	Alto
1	-	Muy Alto

Velocidad del Cauze (m/s)		
Rango mínimo	Rango Máximo	Impacto
0	1	Muy Bajo
1	2	Bajo
2	3	Medio
3	4	Alto
4	-	Muy Alto

de inundación entre los periodos de retorno, sin embargo, los niveles de se ven exacerbados entre un 6% y 9% en relación con su periodo de retorno base. Al igual que la [figura 16](#), el impacto es clasificado en función de su profundidad.

Zona centro de Ecuador (Vía Troncal)

Los resultados para la zona de Babahoyo indican el nivel de impacto muy alto antes escenarios de inundación, existe una poca variabilidad de las áreas

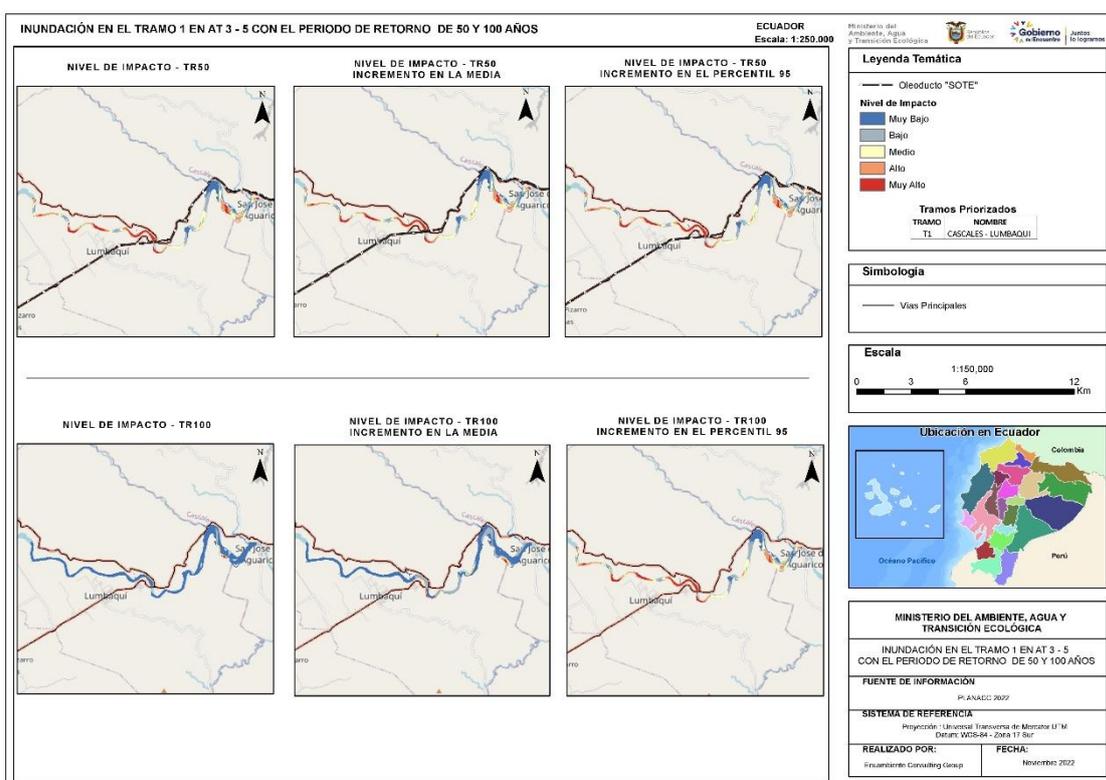


Figura 15. Mapas de inundación en el Tramo 1: Cascales – Lumbaquí en AT 3-5 con periodos de retorno de 50 y 100 años

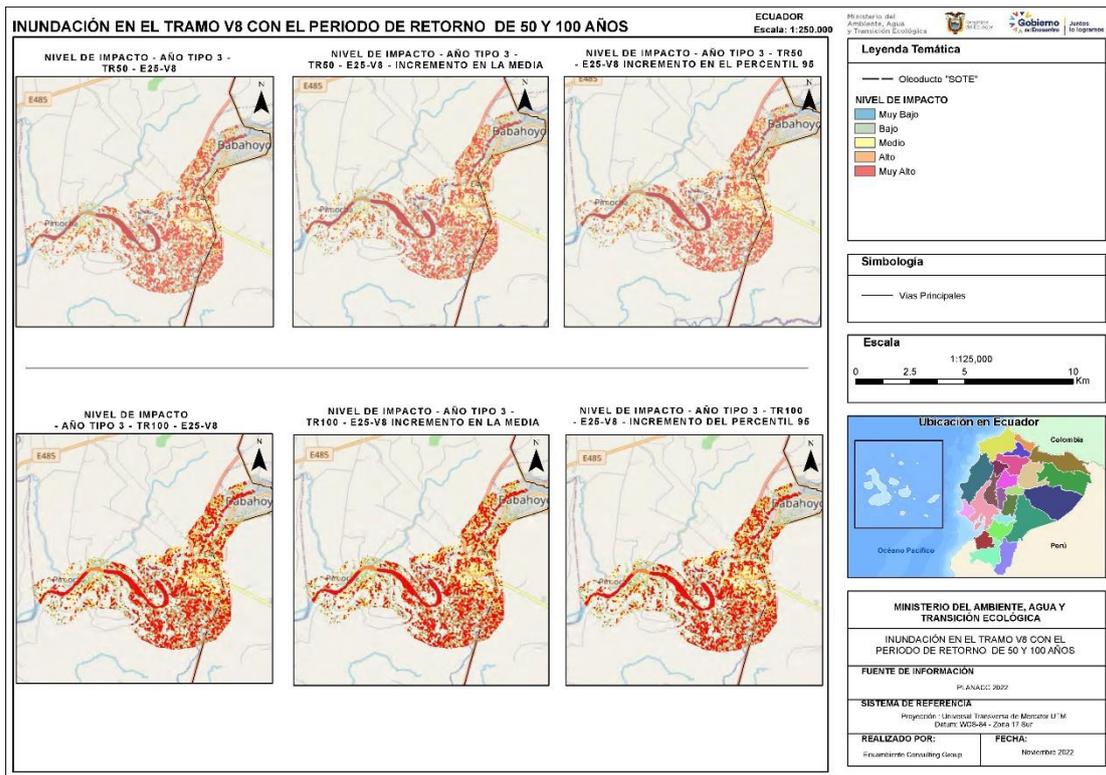


Figura 16. Mapas de inundación en el Tramo 1: Cascales – Lumbaqui en AT 1 - 5con periodos de retorno de 50 y 100 años.

Resultados del análisis de susceptibilidad a deslizamientos en las zonas críticas alrededor del subsector transporte

Análisis de susceptibilidad a deslizamientos en las zonas críticas alrededor del subsector transporte.

Con el objetivo de evaluar el potencial espacial de que ocurran deslizamientos en las vías priorizadas en el subsector transporte, se elaboró un mapa de susceptibilidad ante deslizamientos superficiales (MSDS) con una resolución de 12.5 m en aproximadamente el 30% de todas las vías principales estatales con un buffer de 20 km (Figura 17).

De acuerdo con el MSDS se observó que, las vías con mayor porcentaje de zonas con susceptibilidad alta a muy alta en relación con el tramo analizado son: la E50 (Balsas) con el 73.73%, E35 (Alausí y Canguraca) con el 67.32% y la E 35-50 (Veracruz) con el 72.37%, ubicadas en las provincias de El Oro, Chimborazo, Loja y Morona Santiago respectivamente (Figura 19). En relación con su longitud para estas vías se tiene los siguientes valores; E50: 70 kilómetros, E35: 57 kilómetros y E35-50: 25 kilómetros.

La figura 18 muestra la correspondencia en kilómetros lineales del nivel de susceptibilidad por tramo priorizado

Análisis del impacto biofísico ante deslizamientos en las zonas críticas alrededor del SOTE.

Para el análisis de los impactos de los deslizamientos se tomó como premisa principal que las lluvias fuertes y extremas son los principales factores disparadores de estos. Esto quiere decir que, mientras mayor sea la precipitación en las zonas de alta susceptibilidad será mayor la probabilidad de que un deslizamiento impacte a la infraestructura de transporte.

Para evaluar estas probabilidades se utilizó como referencia la metodología propuesta por The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) en 2019 para la predicción de la ocurrencia de deslizamientos y se generaron tres escenarios dinámicos de impacto por deslizamientos de acuerdo con las precipitaciones históricas y los años típicos para 2020-2050 en los tramos priorizados como se describe a continuación: (1) Impactos por precipitaciones medias (Figura 20); (2) Impactos por precipitaciones en el percentil 95 (Figura 21) e (3)

impactos en sectores con anomalías de precipitación (Figura 22).

De forma general se analizó primero la distribución de los impactos en la totalidad de los tramos priorizados con el objetivo de observar sus tendencias a lo largo de los diferentes escenarios. En primera instancia se observa que, para los escenarios de precipitaciones medias y anomalías de precipitación predominan las áreas de bajo impacto y para las precipitaciones extremas sobre el percentil 95 se esperaría una predominancia de los impactos altos y muy altos. En lo relacionado con los impactos medios estos se mantienen casi similares a lo largo de los diferentes escenarios siendo mayores en los escenarios de precipitaciones sobre el percentil 95 históricas y las anomalías de precipitación asociadas al año típico 1. Estas tendencias podrían sugerir que los deslizamientos a lo largo de las vías están íntimamente relacionados a los procesos de lluvias fuertes o extremas (Figura 20).

En lo que respecta a la distribución espacial de los impactos, para periodos con precipitaciones dentro de la media historia y sus respectivos escenarios de años

típicos del 1 al 5 se observa una clara tendencia a impactar las vías en la Sierra Norte, provincia de Esmeraldas y Oriente Ecuatoriano. Siendo este último donde se concentraría más del 60% de los impactos, sin embargo, estos no llegan a superar en su mayoría a impactos medios sobre la infraestructura (Figura 19). Este escenario es bastante similar al propuesto por las anomalías de precipitación con la diferencia que para el año típico 1 los impactos altos aumentan en las zonas de Cotopaxi y Manabí en un 12 % (Figura 18 y 20), mientras que para los años típicos 2 y 3 no aumentan los impactos altos, pero si aumenta el área de impactos medios en un 40% (Figura 17 y 20).

En contraste con los escenarios de precipitación media y anomalías, el escenario para las precipitaciones del percentil 95 cambia considerablemente, observándose una predominancia de más del 50% de áreas con probabilidad de impacto alto y entre 4% a 5% de impacto muy alto. De acuerdo con este escenario los sectores con mayor impacto serían las troncales sur en las vías E50, E45 y E35; mientras que al Oriente predominan los impactos en la vía transversal E45 (Figura 22).

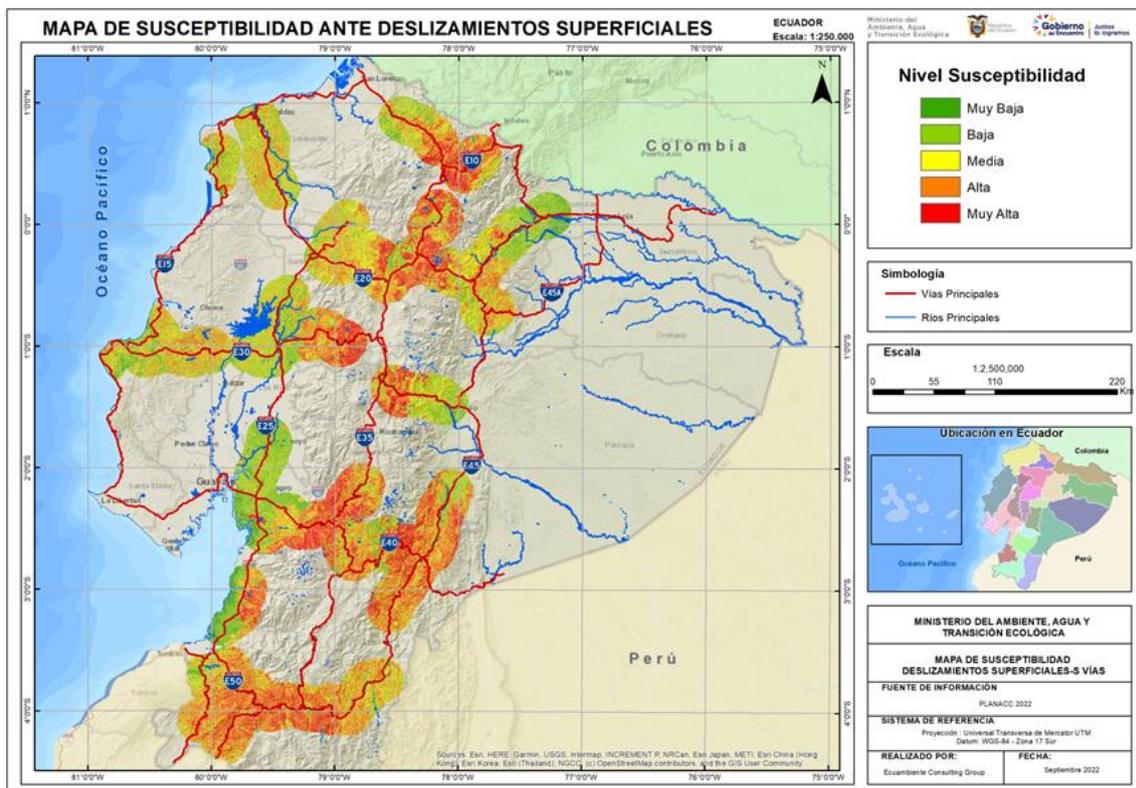


Figura 17. Mapas de susceptibilidad ante deslizamientos superficiales para los tramos priorizados en el subsector de Transporte.

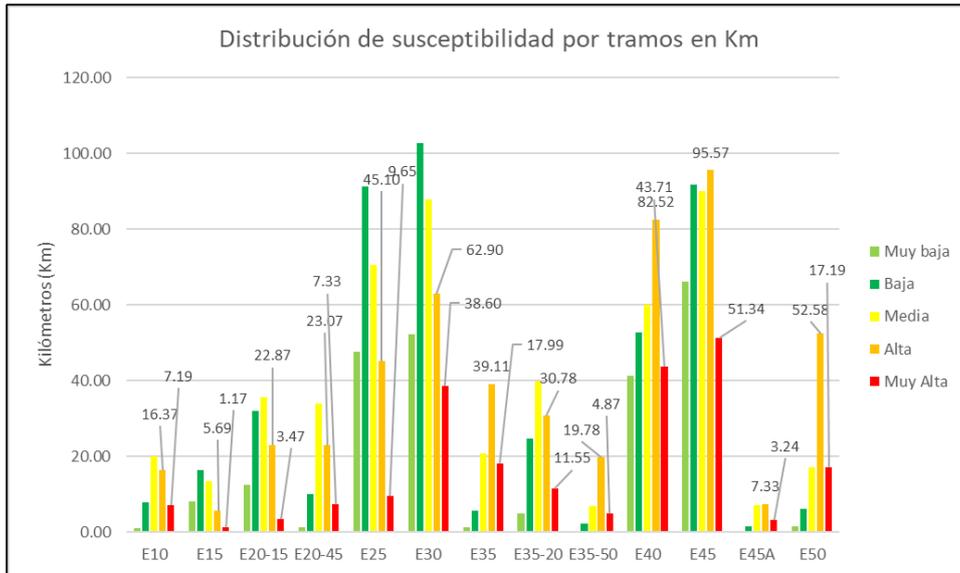


Figura 18. Nivel de susceptibilidad ante deslizamientos superficiales en kilómetros para los tramos priorizado para el subsector Transporte.

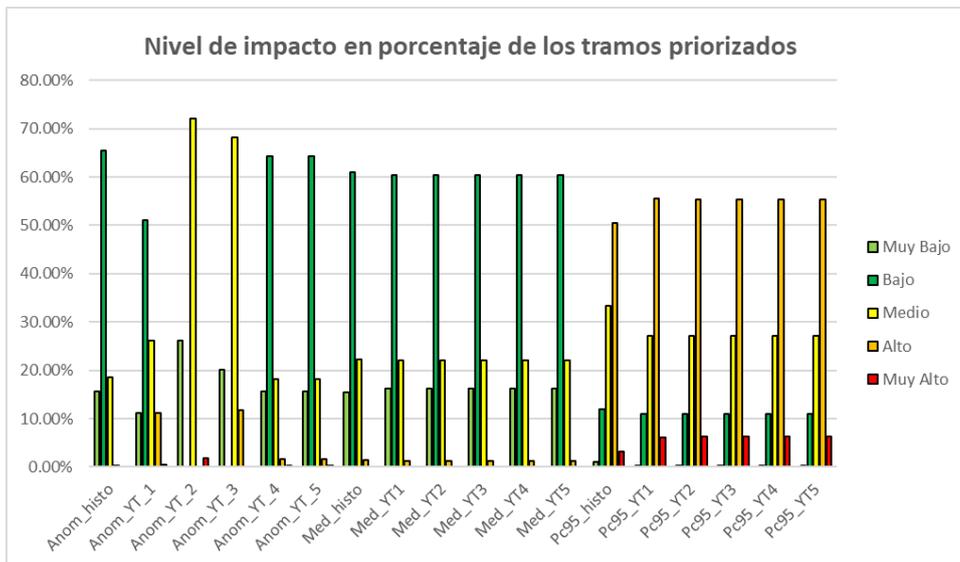


Figura 19. Distribución porcentual de los impactos esperados para los años típicos y periodos históricos para los sectores priorizados de transporte

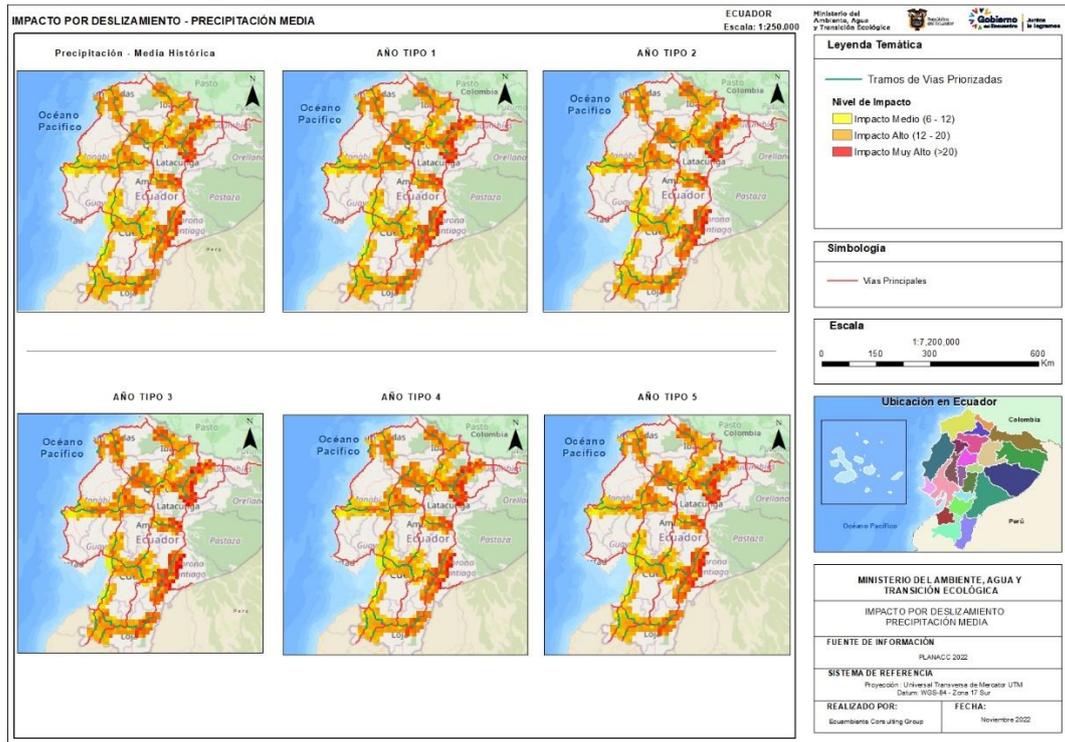


Figura 20. Escenarios dinámicos de impacto por deslizamientos en el escenario de precipitaciones medias históricas y de los 5 años típicos.

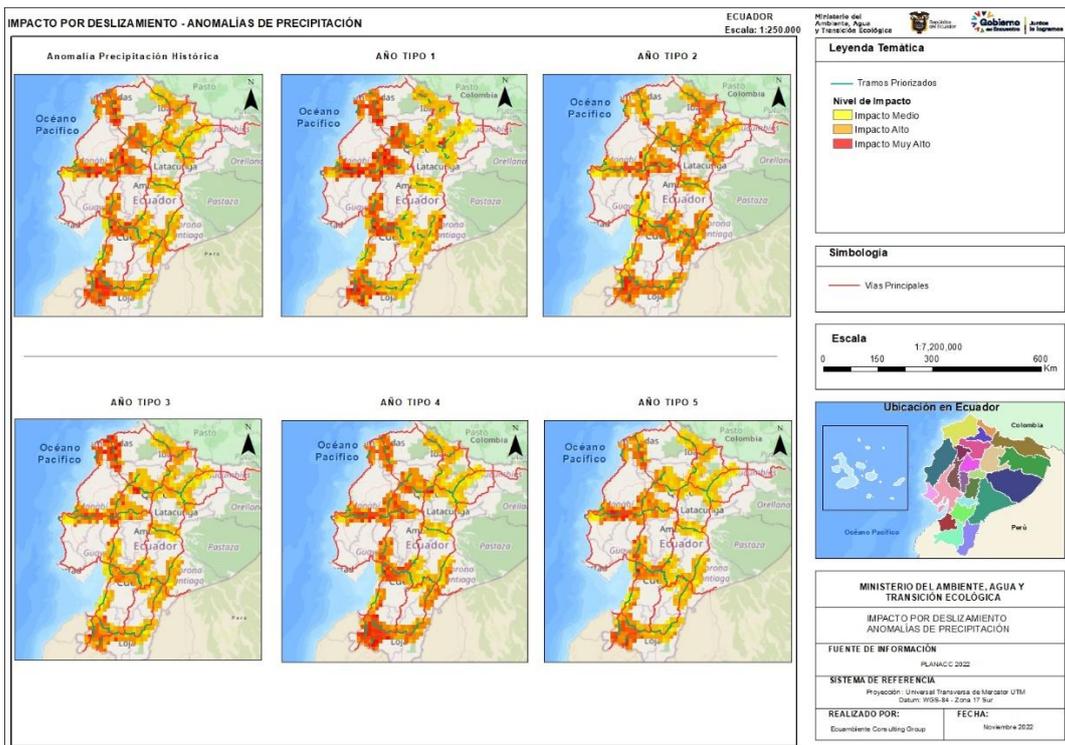


Figura 21. Escenarios dinámicos de impacto por deslizamientos en el escenario de precipitaciones sobre el percentil 95 históricas y de los 5 años típicos.

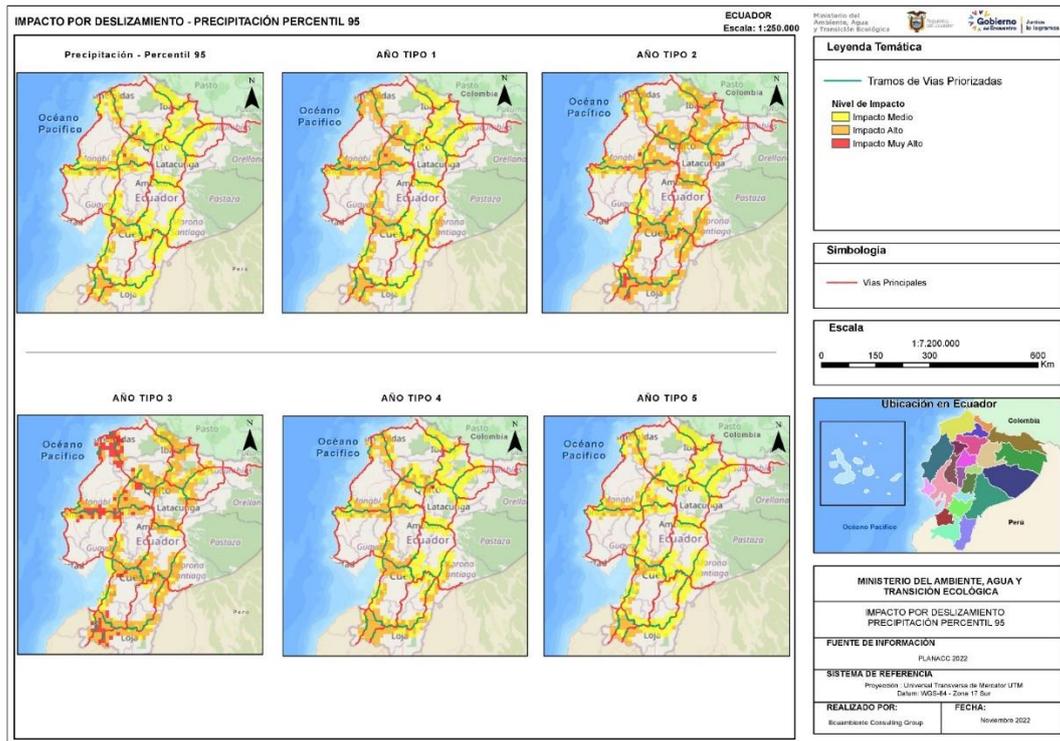


Figura 22. Escenarios dinámicos de impacto por deslizamientos en el escenario de anomalías de precipitación históricas y de los 5 años típicos.

4. Discusión: Análisis de los impactos biofísicos

El sistema de vías es una infraestructura estratégica y los impactos del clima que ocasionan daños, pérdidas y paralizaciones en la conectividad representan disminuciones importantes en la economía del país. La relevancia del análisis de riesgo climático tiene 3 ideas principales: a) la identificación de zonas de alto riesgo climático y su validación con una matriz histórica de eventos de inundación y deslizamientos con

información de campo, mediciones y monitoreo, e impactos que permitan cuantificar no solo las amenazas climáticas sino los daños y paralizaciones, b) la aplicación de modelos hidrológico e hidráulico, que sean validados y que permitan la determinación de umbrales de factores disparadores (precipitación) relacionándolo con los caudales e inundaciones y zonas de deslizamiento, y c) importancia del monitoreo de las condiciones hidrológicas y geotécnicas de las zonas identificadas como críticas (En la [tabla 9](#) se muestra un resumen de los resultados obtenidos).

Tabla 9 Resumen de los tramos priorizados de las vías principales, considerando las categorías de densidad de inundaciones (I) o deslizamientos (D), la tendencia de la precipitación diaria (T. RR) y del número de días con precipitación sobre el percentil 95 (T. #D > 95p).

Nombre	Codigo	Nombre Vía	Provincia	Longitud km	Tipo	Dens. I	Dens. D	T. RR	T. #D > 95p
E10	V1	El Limonal	Imbabura	50,14	D	1	3	≈	↑
E15	V2	San Lorenzo	Manabí	10,73	D	5	1	↑	↑
E15	V3	Rocafuerte	Manabí	32,32	I	5	1	↓	↓
E20-15	V4	San Mateo	Esmeraldas	102,18	I	5	2	↑	↑
E20-35	V5	Tandapi	Pichincha	106,60	D	4	4	↓	↓
E20-45	V6	Cosanga	Napo	72,04	D	1	4	↑	↑
E25	V7	San Miguel de los Bancos	Santo Domingo	62,14	D	3	3	↓	↑
E25	V8	Alfredo Baquerizo Moreno (Babhoyo)	Los Rios/ Guayas	40,61	I	4	1	↓	↓
E25	V9	Churute	Guayas	33,72	I	2	1	↓	↓
E25	V10	Camilo Ponce (Tenguel)	El Oro	42,98	I	5	1	↓	↓
E25	V11	La Victoria	El Oro/Loja	69,94	D	1	2	↓	≈
E30	V12	Portoviejo	Guayas	260,00	I/D	5	1	↓	↑
E30	V13	Mera	Pastaza/ Tungurahua	67,05	D	2	3	≈	↓
E35	V14	San Pedro de Alausí	Chimborazo	47,23	D	1	4	↓	↓
E35	V15	Canguraca	Loja	31,61	D	1	2	≈	↑
E40	V16	Buena Fe	Guayas	172,20	D	2	2	↓	↓
E40	V17	Osayacu	Azuay	91,29	D	1	3	≈	≈
E45	V18	Lumbaqui	Napo	15,85	I	1	2	↑	↓
E45	V19	El Reventador	El Chaco	76,79	D	1	4	↑	↑
E45	V20	Logroño	Morona-Santiago	68,77	I/D	1	2	≈	↓
E45	V21	El Rosario	Morona-Santiago	71,19	D	1	4	≈	≈
E45	V22	Yantzaza	Zamora Chinchipe	138,01	D	3	4	↑	↑
E45A	V23	Hollín	El Oro	18,71	D	1	4	↑	≈
E50	V24	Balsas	El Oro	87,85	D	2	4	≈	↑
E35-50	V25	Veracruz	Morona-Santiago	31,68	D	2	3	≈	↑
				1801,63					

Para conocer y comprender los efectos del cambio climático en las carreteras, es de suma importancia tener una visión adecuada del clima actual y del cambio climático en un futuro cercano. En este estudio se ha desarrollado una metodología que permite

analizar las tendencias históricas y luego ser aplicada a los cinco escenarios futuros de Años Típicos presentados en resultados. En la [tabla 10](#) se presentan los principales hallazgos entre los sitios con impacto por inundaciones.

Tabla 10 Análisis comparativo de los resultados de los modelos de impacto biofísico para inundaciones.

E20-15 San Mateo Quinindé	E25 Camilo Ponce	E25 ABM- Babahoyo	E45 Lumbaqui
Zona de muy alto impacto biofísico, con tendencia de precipitación a aumentar.	Zona de muy alto impacto biofísico, con tendencia de precipitación a disminuir.	Zona de alto impacto biofísico, con tendencia de precipitación a disminuir.	Zona de bajo impacto biofísico, con tendencia de precipitación a aumentar.
Qmax de gran variabilidad aumentado entre 19%-22% entre sus Tr.	Qmax de gran variabilidad aumenta entre 46%-56% y luego reduce 34% entre sus Tr.	Qmax de gran variabilidad entre reduciendo entre 47%-23%.	Qmax de poca variabilidad (estable) aumentado entre 7%-11%.
Los AT superan el Tr:10 años Qmax: 1500m3/s, siendo el AT3 el de mayor impacto.	Los AT superan el Tr:10 años Qmax: 70m3/s, siendo el AT3 el de mayor impacto.	Los AT superan el Tr:10 años Qmax: 677m3/s, siendo el AT3 el de mayor impacto.	Los AT superan el Tr:10 años Qmax: 784m3/s, siendo su respuesta muy similar en todos los AT.

1. Las precipitaciones promedias históricas son mayores en la región Amazónica y en la zona norte de Esmeraldas hacia la zona de San Mateo -Quinindé (E20).
2. Las anomalías de precipitación son positivas en la zona de la costa central, con poco o ningún cambio en la costa, y tienden a disminuir hacia la región Amazónica.
3. Las tendencias de precipitación aumentan hacia la zona del norte de Esmeraldas y en la Amazonía, pero se reduce en ciertas zonas de la costa de Santa Elena y Manabí. En la región interandina las tendencias de precipitación indican reducción de precipitación y sus anomalías.
4. Que las zonas de inundación se encuentran, principalmente en las zonas de la costa, Esmeraldas Norte, Los Ríos- Catarama, y hacia la zona costera de Manabí.
5. La tendencia histórica en las precipitaciones aumenta hacia la zona norte de Esmeraldas, en la Amazonía Norte, y hacia el Sur del país en la frontera con Perú. En cambio, hay una tendencia a reducir la precipitación en la costa en las provincias de Manabí y Santa Elena.
6. En relación con los años típicos el escenario más extremo es el AT3, con mayores variaciones de aumento de precipitación hacia la zona de la Península de Santa Elena y hacia el Guayas. Las implicaciones de este escenario es que se aumentarán las inundaciones en la zona costera con impacto en la infraestructura vial costera. Pero en ciertos sitios hay un aumento en las precipitaciones para luego reducir, esto tiene potencial implicaciones en la infraestructura vial.
7. Para los Años típicos AT4 y AT5 las mayores variaciones se esperan en la zona interandina y esto tiene implicaciones en la recurrencia de eventos de deslizamiento según el mapa de susceptibilidad desarrollado en este estudio.
8. Es importante considerar las condiciones de vulnerabilidad del sistema de vías que estará recurrentemente expuesto a inundaciones y deslizamiento. Se recalca la importancia de documentar todos los eventos de deslizamiento e inundaciones tanto en la Base de datos del Servicio de Riesgos y Emergencias, como en la base de datos del Sistema de Transporte Público.
9. Los diferentes aspectos desarrollados en este estudio para entender los patrones y tendencias de la amenaza climática, la modelación hidrológica e hidráulica desarrollada para los sitios más críticos para inundaciones, y el análisis de susceptibilidad a deslizamiento sirven de base para seguir al planteamiento de las medidas de adaptación y aumento de la resiliencia del sistema como parte del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático para el sector de Transporte.

Caso de estudio: Escenario de Inundación en la Troncal E-25 sector Babahoyo

En este estudio de caso se presenta un evento histórico y los detalles climáticos y técnicos del mismo, así como las acciones tomadas y recomendaciones para futuros eventos de inundaciones en el contexto de la resiliencia y adaptación al cambio climático.



El caso de estudio fue analizado en el Taller con actores sectoriales y tiene como objetivo presentar un evento histórico con su información meteorológica, los niveles de exposición y los impactos causados. El mensaje es el proporcionar información personalizada a los usuarios finales para la toma de decisiones en relación con la respuesta a un evento climático. Esto implica hacer interpretaciones y sugerencias para su uso en un entorno de ya de por sí amplio. Variabilidad del clima actual e incertidumbres aún mayores cuando se considera los escenarios climáticos futuro. Los actores participaron activamente y establecieron recomendaciones de acciones para la recuperación y adaptación en el contexto del cambio climático.

El 29 de marzo de 2012 en La Chorrera, salida a Quevedo, donde el río del mismo nombre carcomió las bases de un puente, deshabilitó por completo el tránsito que conecta a Quevedo, además de una parte de la ruta Guayaquil-Quevedo-Santo Domingo.

Condiciones climáticas y biofísicas de la zona

La zona del evento se encuentra en la cuenca del río Babahoyo y Catarama, caracterizado por una litología de tipo aluvial areno-arcilloso, de susceptibilidad muy baja a deslizamiento por ser una zona baja.

- Precipitaciones > 20 mm día son consideradas altas, llegando a 80 mm de precipitación/día afectando al caudal de los ríos.
- Escenario de periodo de retorno Tr: 10 años.
- Condiciones disparadoras: Precipitación 36 mm/día.
- Precipitación acumulada en 7 días: 91mm saturando el suelo.
- Tendencia histórica.

Daños en la infraestructura de la carretera:

- Afectación a la infraestructura de puente.
- Deterioro de la capa asfáltica.
- Deterioro y deformación de las capas estructurales del pavimento (base y subbase)
- Saturación y deformación de las capas no estructurales bajo la subrasante, daño de los taludes.
- Sedimentación y taponamiento de cunetas y alcantarillas.

Impactos

- Restricción vehicular, interrupción de la vía Guayaquil -Quevedo- Santo Domingo
- Perdida de la producción agrícola por paralización del transporte.
- Aislamiento de comunidades rurales por destrucción de puentes y daños en alcantarillas.
- Aumento de casos de dengues seguido a las inundaciones.

Acciones de respuesta a la población

- Activación del COE, Comité de Operaciones de Emergencia desde el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos, las carteras de Estado que mantienen: ECU, MSP, MTOP, MIES, con la activación de las respectivas mesas técnicas.
- Implementación de albergues para los afectados y dotación de Ayuda Humanitaria.
- Evacuación de la población con el apoyo de instituciones de respuesta y dotación de Kits de primeros auxilios y alimentos a las personas que se quedaron incomunicadas.
- Rescate de personas perjudicadas, mediante equipos de rescate.

Respuesta para recuperar la operatividad del sistema vial

- Habilitación de las carreteras principales y limpieza de canales y alcantarillas.
- En el caso de puentes, se analiza la colocación de puentes provisionales (medida a corto plazo), incluyendo la creación de pasos provisionales, todo esto se lo hará entre el MTOP y el GAD Provincial o Prefecturas.
- Enviar maquinaria para rehabilitación de las vías afectadas.
- Deshabilitar la vía completa o parcialmente para vehículos pesados por horarios.

- Controlar el paso vehicular y la habilitación de paso provisional para mantener la circulación.
- Marcar las cotas o alturas de inundación para un futuro estudio técnico de mitigación. Ubicar sitios de flujo de agua que podrían requerir nuevas alcantarillas o pasos de agua, de modo que se mitigue el tiempo de inundación.

Acciones Futuras para la Prevención y Reducción de impactos

- Mantenimiento del cauce natural y protección de cauces y riberas (construcción de muros), mantenimiento y limpieza periódica de alcantarillas y cunetas.
- Con la información tomada registrada durante la inundación, diseñar y si es posible incrementar la altura del relleno.
- Diseñar nuevas alcantarillas o pasos de agua o aumentar el diámetro de alcantarillas, limpieza oportuna y/o periódica de las mismas de modo que se mitigue o baje el tiempo de inundación para evitar sobresaturación y colapso de la carpeta asfáltica.
- Diseñar en lo procedente un posible subdrenaje para salvaguardar la carpeta asfáltica.
- Estudios para diseño barreras de contención naturales (iniciativas de reforestación) y soluciones basadas en la naturaleza

5. Conclusiones

- De los 6026.7 km de vías estatales el 30 % fueron priorizadas en los siguientes tramos de mayor impacto biofísico en el sector transporte: E10: El Limonal, E15: San Lorenzo-Rocafuerte, E20: San Mateo-Tandapi-Cosanga, E25: San Miguel de los Bancos-Alfredo Baquerizo Moreno (Babahoyo)-Churute-Camilo Ponce-La Victoria, E30: Portoviejo-Mera, E35: Alausí-Canguraca, E35-E50: Veracruz, E40: Buena Fe-Osayacu, E45: Lumbaqui-El Reventador-Logroño-El Rosario-Yantzaza-Hollín, E50: Balsas.
- Los tramos E20 (102 km) y E25 (139 km) en la zona litoral (Esmeraldas, Guayas y El Oro) y E45 (16 km) en el oriente (Napo) se consideran priorizados ante impactos por inundaciones, mientras que los deslizamientos están preferentemente en la zona interandina, cordillera oriental, occidental y montañosa de la costa correspondientes a los tramos E10 (50 km), E15 (43 km), E30 (327 km), E35 (79km), E40 (234 km), E45 (354.76 km) y E 50 (87.85 km).
- Considerando los escenarios de años típicos futuros las vías en los sectores Portoviejo, Mera, Buena Fe, Osayacu, Lumbaqui, El Reventador, Logroño, El Rosario, Yantzaza, Hollín son las de mayor impacto por deslizamientos, con aproximadamente el 68 % de su trazado con muy alta susceptibilidad (42

km) y precipitaciones diarias >27 mm. El año típico de mayor impacto en estos tramos es el AT3.

- En condiciones futuras más extremas como el Año Típico 3 con intensidades de precipitación máxima > a 110 mm, **se generan caudales**
- El presente análisis ha demostrado que existe una tendencia histórica al aumento de la precipitación en la mayoría de los tramos de la infraestructura vial con algunos sitios donde se producen reducciones de la precipitación, por lo tanto, en escenarios de cambio climático la magnitud y recurrencia de eventos extremos de deslizamientos, aumentará progresivamente.
- Una de las conclusiones de este estudio, es que los factores que deben considerarse en un análisis de riesgos climáticos deben incluir las características climáticas de precipitación y temperatura, los factores biofísicos como uso de suelo, cobertura vegetal, pendientes, litología, entre otros factores que fueron aplicados en el análisis de sustentabilidad. Es crítico documentar la vulnerabilidad de la infraestructura del sistema vial y del sistema de operación de este durante eventos adversos climáticos y no climáticos.
- Con un incremento de 7% a 38% precipitación para un periodo de retorno de 10 a 100 años, se espera un incremento de entre 7% a 42% en los caudales en las cuencas de la Amazonía. Para las cuencas en la zona costera se esperan

mayores incrementos en la precipitación entre un 66% a un 119%, que aumentará los caudales máximos entre un 19% y 64%, con variabilidad en ciertas zonas costeras donde primero aumentan los caudales, pero luego se reducen debido a la tendencia de reducción de la precipitación.

- Además de las precipitaciones de alta intensidad, también son importantes las lluvias de baja intensidad, pero acumuladas, ya que en zonas con condiciones de suelo desfavorable (por ejemplo, limo- arcillosa), pueden provocar suelos saturados y deslizamientos en zonas que ya son susceptibles a estos eventos.
- Se ratifica la importancia de generar matrices de eventos con información climática, geotécnica y de impacto. Para poder validar, monitorear y evaluar las medidas de respuestas y de prevención, es necesario pasar de una respuesta a una contingencia con un enfoque de gestión de riesgo y resiliencia del sistema.
- La necesidad de tener un análisis de vulnerabilidad específico a los sitios de alta susceptibilidad en función del proceso desarrollado en este análisis de riesgo con los actores claves, se propone un esquema basado en algunas de las lecciones aprendidas durante el proceso y que considera también las recomendaciones para la adaptación al cambio climático.

6. Recomendaciones

- La necesidad de aumentar la capacidad de monitoreo meteorológico, geotécnico de las zonas críticas, incorporando en sus planes de mantenimiento estos procesos como acciones de resiliencia y adaptación.
- Incluir algunas variables climáticas adicionales como: velocidad del viento, velocidad del agua. Humedad del suelo, flujos de detritus, procesos de subsidencia, temperatura, presencia de nieve, así como el número de días sin lluvia (sequía) para el manejo de inundaciones y deslizamientos.
- Referente a la revisión de datos entregados por la entidad contratante respecto a cambio climático, se recomienda utilizar los datos de

cada uno de los GCMs para proyectos futuros. Estos datos permiten el cálculo de la incertidumbre intermodelos, lo cual es importante en estudios con esta temática.

- Se recomienda proveer de distribuciones típicas diarias de precipitaciones a lo largo del periodo 2020-2050, ya que esto permitirá en un futuro obtener nuevas ecuaciones de intensidad-duración-frecuencia y revisar las diferencias con las históricas.

Recomendaciones específicas para el Sector:

- Mejorar o implementar estaciones meteorológicas e hidrológicas para la validación de los modelos obtenidos.
- Análisis de datos climáticos y registro histórico de eventos en una Base de Datos integrada de clima y eventos registrados.
- Alianzas interinstitucionales para implementación de obras y acciones.
- Diseño, prueba e implementación del **Sistema de Alerta Temprana**, que permita conocer los posibles impactos que tendrá el fenómeno en la zona y poder articular acciones entre los actores involucrados y evacuar con anticipación a las personas para que no existan pérdidas humanas y reducir los daños a la infraestructura crítica.
- Análisis de la Vulnerabilidad del Sistema Vial: Tener un monitoreo periódico del estado actual de las estructuras viales (alcantarillas, puentes, pasos deprimidos, etc.) esto se lo haría mediante inspecciones con personal especializado en el tema.
- Realizar estudios para construcción de obras de infraestructuras viales considerando los niveles de precipitación del lugar y si es necesario realizar el aumento del nivel de rasante de la estructura.
- Capacitar al personal técnico para el montaje de puentes provisionales en caso del colapso de estructuras.
- Reconstrucción o rediseño de sistemas de drenaje pluvial considerando las previsiones de variabilidad y cambio climático, ya que los actuales han colapsado.

- A nivel institucional asignar una unidad específica que gestione los programas de adaptación de la Red Vial Estatal.
- Incorporar mejoras en procesos contractuales relacionados a variación climática (RED VIAL).
- Replicar información de estos resultados (taller) a nivel desconcentrado, tanto al MAATE, MTOP, o GAD's.

7. Bibliografía

- Adeyemi, O., & Fashae, O. A. (2018). Urbanisation and hydraulic geometry response: a model approach. *International Journal of Water*, 12(2), 103. <https://doi.org/10.1504/ijw.2018.10012407>
- Aranguren, I. (2019). *Quantitative risk analysis of transportation infrastructure affected by river flooding: A Case Study considering Climate Change*. [Delft University of Technology]. <https://repository.tudelft.nl/>
- Bles, T., Bessembinder, J., Chevreuril, M., Danielsson, P., Falemo, S., & Venmans, A. (2015). *CEDR Transnational Road Research Programme Call 2012: Road owners adapting to climate change ROADAPT Roads for today, adapted for tomorrow Guidelines*.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). *Gis Technology in Mapping Landslide Hazard* (pp. 135–175). https://doi.org/10.1007/978-94-015-8404-3_8
- Carrillo, C., & Mejía, N. (2016). *Utilización del modelo "HEC-HMS" en Sistemas de Pronósticos Hidrológicos y Verificación de los datos obtenidos por el Modelo CMFORH, en la cuenca del Río Sucio*. Universidad de El Salvador.
- Castro, C. v., & Maidment, D. R. (2020a). GIS preprocessing for rapid initialization of HEC-HMS hydrological basin models using web-based data services. *Environmental Modelling & Software*, 130, 104732. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104732>
- CIIFEN. (2022). *Climatología y Anomalía*. CIIFEN. <https://ciifen.org/climatologia-y-anomalia/>
- CMC-INT. (2021). *Informe de Generación de Series de Tiempo Diarias para Aplicaciones Sectoriales Incluyendo Series para 5 Años Tipo en el Periodo 2020-2050*.
- Dunkerley, D. (2022). Huff quartile classification of rainfall intensity profiles ('storm patterns'): A modified approach employing an intensity threshold. *CATENA*, 216, 106371. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2022.106371>
- EU_CIRCLE Project. (2019). *Final Report EU-CIRCLE A panEuropean framework for strengthening Critical Infrastructure resilience to climate change Final Report*. www.eu-circle.eu
- Forzieri, G., Bianchi, A., Silva, F. B. e, Marin Herrera, M. A., Leblois, A., Lavalle, C., Aerts, J. C. J. H., & Feyen, L. (2018). Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change*, 48, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007>
- Gómez, D. (2013). *Reporte Preliminar de Zonas Críticas por Peligros Geológicos de la Región Puno*.
- González, O., & Buitrago, C. (2012). *Hoja metodológica del indicador Anomalía de precipitación*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.ideam.gov.co/documents/24155/123679/18-1.08_HM_Anomalia_precipitacion_3_FI.pdf/c60552b2-0808-4a1c-9c29-d34b3bb7662d
- Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (GEMMA). (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas*.
- Guzmán, A., Gaspari, F., de Antueno, L., & Montealegre, F. (2019). Identificación de Anomalías Climáticas a través de precipitación satelital, en el sistema Serrano Bonaerense - Argentina. *Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales*.
- Guachamín, W., García, F., Arteaga, M., & Cadena, J. (2015). *Determinación de Ecuaciones para el Cálculo de Intensidades Máximas de Precipitación*.
- Hydrologic Engineering Center. (2022a). *HEC-RAS River Analysis System - User's Manual*.
- Hydrologic Engineering Center. (2022b). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*.
- INGEMMET. (2013). *ZONAS CRITICAS POR PELIGROS GEOLOGICOS EN LA REGIÓN PUNO*. In Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.
- INAMHI. (2019). *Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Actualización del estudio de lluvias intensas. Versión 2*. Quito, Ecuador.
- IPCC. (2021). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou

- (eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/ RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4 SPEC. ISS.), 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>
- Mormeneo, I., & Díaz, R. (2003). Método para clasificar la anomalía de lluvias. *Revista Brasileira de Agronometeorología*, 11(1), 159–167.
- Olaya, J., Dewez, R., Guerrero, P., Benoit, L., Nalesso, M., & Zuloaga, D. (2020). Incluir el cambio climático en el análisis hidrológico para el trazado y diseño de infraestructura de transporte.
- Ozdemir, A. (2020). A Comparative Study of the Frequency Ratio, Analytical Hierarchy Process, Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Methods for Landslide Susceptibility Mapping: Taşkent (Konya), Turkey. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(4), 4129–4157. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01284-8>
- PLANACC. (2021). Generación de información de clima futuro a nivel nacional para el periodo 2020 –2050 a partir de un análisis de circulación atmosférica y el empleo de modelos climáticos del CMIP6.
- Prieto Villarroya, J., Farias, H. D., & Amarilla, M. E. (n.d.). Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC: Automatización del cálculo mediante S.I.G. y nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo.
- Publicación Geológica Multinacional (PMA: GCA). (2007). "Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (GEMMA).
- Quiroga, V. M., Kurea, S., Udoa, K., & Manoa, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana Del Agua*, 3(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/J.RIBA.2015.12.001>
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation*. (Vol. 1). McGraw-Hill International Book.
- Villarroya, J., Farias, H., & Amarilla, M. E. (2013). Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC: Automatización del cálculo mediante S.I.G. y nuevas

fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo. *IX Jornadas de Ciencia y Tecnología*.