

2020

Estado del arte de metodologías para la evaluación de vulnerabilidad a nivel social y económico debido a amenazas de procesos de remoción en masa

Maria Fernanda Garcia Moreno
Universidad de La Salle, Bogotá

Jorge Andrés Ricardo Santana
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil



Part of the [Civil Engineering Commons](#)

Citación recomendada

Garcia Moreno, M. F., & Ricardo Santana, J. A. (2020). Estado del arte de metodologías para la evaluación de vulnerabilidad a nivel social y económico debido a amenazas de procesos de remoción en masa. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/882

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Civil by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

ESTADO DEL ARTE DE METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE
VULNERABILIDAD A NIVEL SOCIAL Y ECONÓMICO DEBIDO A AMENAZAS DE
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR:

ING. Alexander Padilla

PRESENTADO POR:

Maria Fernanda Garcia Moreno

Jorge Andrés Ricardo Santana

Universidad de la Salle.

Programa de ingeniería civil.

Bogotá, 2020

ESTADO DEL ARTE DE METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA
VULNERABILIDAD A NIVEL SOCIAL Y ECONÓMICO DEBIDO A AMENAZAS DE
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR:

ING. Alexander Padilla

PRESENTADO POR:

Maria Fernanda Garcia Moreno

Jorge Andrés Ricardo Santana

Universidad de la Salle.

Programa de ingeniería civil.

Bogotá, 2020

Agradecimiento

Agradezco al cuerpo de docentes de la universidad de la Salle facultad de ingeniería civil, quienes nos acompañaron en el camino de vida universitaria, hoy podemos decir que nos formaron como ingenieros civiles. Al ingeniero Alex Padilla quien fue nuestro director de este trabajo, quien con su apoyo nos acompañó para terminar con éxito este proceso y a mi compañero Jorge Andrés Ricardo por su trabajo en la construcción de esta investigación.

María Fernanda García Moreno

Dedicatoria

A Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, por acompañarme y levantarme siempre.

Y a mis padres por haberme forjado como la persona que soy y enseñarme a no rendirme nunca.

María Fernanda García Moreno

Agradecimiento

Agradezco a Dios por permitirme realizar uno de los pasos más importante de mi vida.

A mi familia por ser ese motor que me impulsa a lograr todas mis metas y sueños.

Agradezco a nuestro director Alexander Padilla, ingeniero civil de la Universidad De La Salle, por su aporte, su disposición, su apoyo y su valiosa orientación durante el desarrollo del proyecto.

A mi compañera María Fernanda García Moreno por la entrega y el compromiso al realizar un estupendo y arduo trabajo.

A todos mis amigos y compañeros de estudio que siempre me brindaron una mano cuando lo necesitaba.

A todos muchas gracias, sin ustedes esto no fuera posible.

Dios los bendiga.

Jorge Andrés Ricardo Santana

Dedicatoria

Dedico este gran logro especialmente a Dios quien me permitió llegar y alcanzar este momento tan importante en mi vida, a mis padres, y familiares por el esfuerzo y acompañamiento incondicional que me han brindado, por todos los sacrificios que hicieron durante toda mi carrera, también a los docentes, compañeros y amigos que estuvieron en todo el proceso académico para que yo pudiera formarme como ingeniero civil y principalmente como persona.

Muchísimas gracias a todos, Dios los bendiga hoy y siempre.

Jorge Andrés Ricardo Santana

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Pérdidas de productos perecederos.	12
Ecuación 2. Pérdidas de productos no perecederos	12
Ecuación 3. Pérdidas de productividad de la mano de obra	12
Ecuación 4. Pérdidas por abordar vías alternas.....	12
Ecuación 5. Costos adicionales por cambio de ruta.....	12
Ecuación 6. Número de personas en hora pico.	23
Ecuación 7. Exposición.....	23
Ecuación 8. Número de usuarios afectados.....	23
Ecuación 9. Pérdidas de productos agrícolas.	23
Ecuación 10. Pérdidas de ganadería.....	24
Ecuación 11. Pérdidas de mercancías.	24
Ecuación 12. Tasa anual de interrupción para cada tramo.....	26
Ecuación 13. Productos perecederos.....	26
Ecuación 14. Mano de obra paralizada.	26
Ecuación 15. Peajes no recibidos.	26
Ecuación 16. Vulnerabilidad directa.....	32
Ecuación 17. Vulnerabilidad directa a los daños a personas.	32
Ecuación 18. Pérdidas indirectas debido a la pérdida de tiempo laborable.	33
Ecuación 19. Pérdidas indirectas debido al aumento de distancia.	33
Ecuación 20. Número de trabajadores afectados por hora.....	34
Ecuación 21. Tasa de actividad en la zona.....	34
Ecuación 22. Costo de un trabajador por hora.	34

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Indicador de probabilidad de falla.	15
Ilustración 2. Probabilidad temporal de falla.	16
Ilustración 3. Probabilidad de que haya una fatalidad.	17
Ilustración 4. Escala de falla.	18
Ilustración 5. Velocidad de falla.	18
Ilustración 6. Magnitud del evento.....	18
Ilustración 7. Matriz de consecuencias.	19
Ilustración 8. Clasificación de la amenaza.	19
Ilustración 9. Niveles de riesgo.....	19
Ilustración 10. Calificación del nivel de riesgo de consecuencias.	20

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Términos de búsqueda.	8
Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda.....	9
Tabla 3 Ecuaciones para estimación de pérdidas de productos perecederos, no perecederos, paralización de mano de obra y por abordar vías alternas.	12
Tabla 4. Variables para evaluación de vulnerabilidad en carreteras.	14
Tabla 5. Ecuaciones para pérdidas de agricultura, ganadería y mercancías.	23
Tabla 6. Ecuaciones de pérdidas de mano de obra paralizada, productos perecederos y peajes no recibidos.	26
Tabla 7. Parámetros de evaluación para costos consecuentes directos.	29
Tabla 8. Ecuaciones para pérdidas debido a pérdida de tiempo no laborable y aumento de distancia.	33
Tabla 9. Número de desastres por remoción en masa y víctimas fatales en cada país Andino, periodo 1901-2011.	36
Tabla 10. Resumen de metodologías	40
Tabla 11. Pérdidas indirectas a considerar	44

Tabla de Contenido

Resumen	1
Palabras claves:	2
Abstrac	2
Key words:	2
Introducción	3
Justificación	4
Pregunta de investigación	6
Objetivos	6
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
Metodología	7
Recopilación y revisión de literatura web	8
Ecuaciones de búsqueda	8
Organización de la información	10
Locales	10
Nacionales	10
Metodología para la cuantificación de pérdidas económicas en corredores viales por deslizamientos y avalanchas Caso piloto aplicado a tres tramos de la vía concesionada Bogotá-Villavicencio para deslizamientos superficiales.	10

Metodología para la Evaluación de Riesgo en Corredores Viales	21
Metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial – aplicación carretera Bogotá – Villavicencio (Colombia)	25
Antecedentes internacionales	28
The Economic Impact of Landslides and Floods on the Road Network. Mike G Winter, Barbara Shearer, Derek Palmer, David Peeling, Clare Harmer and Jonathan Sharpe. 2016	28
Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debido a procesos geomorfológicos.....	30
Colombia frente a otros países Latinoamericanos	35
Discusión de resultados.....	39
Conclusiones y recomendaciones	46
ANEXOS	48
Bibliografía	52

ESTADO DEL ARTE DE METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A NIVEL SOCIAL Y ECONOMICA DEBIDO A AMENAZAS DE MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA

Resumen

La topografía, la geología y el clima de Colombia hacen que sea un país susceptible a la ocurrencia de fenómenos de remoción masa. Estos fenómenos a menudo afectan la infraestructura vial, provocando cierres viales continuamente.

Dada esta problemática, este estado del arte presenta las diferentes metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad social y económica con el fin de brindar un apoyo y contribuir en la mitigación de riesgos de la infraestructura vial ya que permite dar aviso sobre posibles problemas presentes en los diferentes corredores viales; además de ser una guía para futuras investigaciones. Es importante tener en cuenta que algunos de los criterios y parámetros utilizados en las metodologías varían según el país y la zona de aplicación.

La investigación se realizó de forma progresiva, iniciando con la recopilación bibliográfica, la selección de información relevante, teniendo en cuenta información nacional e internacional, principalmente de países latinoamericanos. El factor común de la búsqueda fue la afectación en infraestructura vial por movimientos de remoción en masa.

Se encontraron cuatro metodologías, de las cuales dos fueron implementadas en casos de estudio en el país.

Después de analizar las metodologías se concluye que son pocos los estudios realizados en este tema y la mayoría de los autores recomienda aumentar las investigaciones.

Palabras claves: Vulnerabilidad, vulnerabilidad social, vulnerabilidad económica, fenómenos de remisión en masa, infraestructura vial.

Abstrac

The topography, geology and climate of Colombia make the sea a country susceptible to the occurrence of mass removal phenomena. These phenomena often affect the road infrastructure, causing road closures continuously.

Given this problem, this state of the art presents the different methodologies for the evaluation of the social and economic evaluation in order to provide support and contribute to the mitigation of risks of road infrastructure that allows giving notice of possible problems present in the different road corridors; in addition to being a guide for future research. It is important to note that some of the criteria and parameters used in the methodologies affected according to the country and the area of application

The research was carried out progressively, starting with the bibliographic compilation, the selection of relevant information, taking into account national and international information, mainly from Latin American countries. The common factor of the search was the impact on road infrastructure due to mass removal movements.

Four methodologies were found, of which two were implemented in case studies in the country.

After analyzing the methodologies, it is concluded that there are few studies carried out on this topic and most of the authors recommend increasing research.

Key words: vulnerability, social vulnerability, economic vulnerability, landslide, road.

Introducción

Los fenómenos de remoción en masa ocurren por las altas precipitaciones, sismos, erupciones volcánicas o intervenciones antrópicas. Estos eventos se manifiestan de forma aleatoria y materializan el riesgo, por ende, se debería conocer mejor las variables del riesgo; amenaza y vulnerabilidad.

Actualmente la infraestructura vial de Colombia ha sido afectada por movimientos de remoción en masa que son detonados principalmente por lluvias, generando múltiples cierres viales, aumento en la tasa de accidentalidad y pérdidas económicas, lo que induce a la construcción de alternativas que mitiguen estos daños.

Por lo tanto, es importante estudiar no solo la amenaza sino también la vulnerabilidad, entendiendo esta como el grado de susceptibilidad ante la presencia de un fenómeno de remoción en masa a nivel social y económico. Por consiguiente, esta investigación presenta un estado del arte de diferentes metodologías que evalúan la vulnerabilidad social y económica, para facilitar la estimación de esta.

Este trabajo será útil para futuras proyectos que busquen construir una guía metodológica que logre evaluar la vulnerabilidad, de modo que se llegue a una estimación integral del riesgo, para que posteriormente se generen mejores planes de contingencia.

Justificación

Colombia al ser atravesada por la Cordillera De Los Andes, presentar cadenas montañosas y accidentes geográficos, se convierte en un escenario propenso a la ocurrencia de movimientos de remoción en masa. También, la lluvia es un factor importante para que se materialicen estos fenómenos.

De acuerdo con los registros del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del SGC, “desde 1900 hasta 2017, en el país se reportaron 16.969 movimientos en masa.” En el año 2015 El Servicio Geológico Colombiano desarrolló el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000, en el cual identificó que aproximadamente el 50% del territorio nacional se encuentra categorizado en amenaza baja por movimientos en masa, 22% amenaza media, 20% amenaza alta y 4 % en amenaza muy alta.

Dichos eventos de remoción en masa afectan continuamente la infraestructura vial, evidencia de ello es el fenómeno de La Niña 2010-2011 que afectó más de 1.600 kilómetros de infraestructura vial (Ministerio de Transporte, 2011). También es importante mencionar lo ocurrido en 2019 en las principales vías del país, teniendo como caso más relevante la vía Bogotá – Villavicencio.

Las constantes emergencias que presenta Colombia a causa de movimientos de remoción en masa hacen evidente su vulnerabilidad, entendiendo esta como la no capacidad de respuesta ni la habilidad para adaptarse al nuevo escenario generado (comisión económica para América latina y el caribe) (CEPAL, 2005). Además, los movimientos de remoción en masa de acuerdo con su intensidad y localización tienen la potencialidad de generar grandes pérdidas que podrían comprometer la estabilidad económica y social del país. (Banco Mundial, 2012).

En vista de la afectación provocada por los movimientos en masa se han realizado estudios sobre zonificación de la amenaza por movimientos en masa. Sin embargo, de acuerdo con el plan de acción regional para la implementación del Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030 en las Américas, plantea como prioridad: comprender el riesgo de desastres, que es definida como “el resultado de la interacción de tres factores: amenaza, vulnerabilidad y exposición” (CEPAL, 2005). Lo que infiere que no es suficiente conocer la amenaza, sino también es necesario entender la vulnerabilidad.

Aunque en 2012 se generó la ley 1523 de 2012 por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión de riesgo y desastre, el cual junto con el INVIAS trabajan en la gestión del riesgo para generar alternativas que permitan la mitigación del riesgo, comprendiendo este como la suma de la amenaza y la vulnerabilidad. Sin embargo, aún no se plantean metodologías que permitan evaluar la vulnerabilidad social y económica.

Entonces la prioridad de esta investigación es realizar una recopilación de información enfocada a metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad social y económica realizadas en países con características de topografía, geología y clima similares a las de Colombia con el fin de fortalecer el conocimiento relacionado con la evaluación de la vulnerabilidad social y económica, para permitir la reducción de esta y contribuir al desarrollo sostenible del país.

Pregunta de investigación

¿Cuáles son las metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad social y económica debido a amenazas de procesos de remoción en masa en infraestructura vial?

Objetivos

Objetivo general

Realizar el estado del arte de las metodologías para evaluación de la vulnerabilidad social y económica debido a amenazas de procesos de remoción en masa en infraestructura vial.

Objetivos específicos

Describir las metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad social y económica debido a procesos de remoción en masa en la infraestructura vial.

Reconocer las variables consideradas para la evaluación de la vulnerabilidad social y económica.

Describir la situación actual de la vulnerabilidad social y económica debido a movimientos de remoción en masa.

Metodología

Fase 1: Recopilación y revisión de literatura web

Búsqueda local (repositorio de la universidad), nacional e internacional. Para la búsqueda se implementarán los operadores de búsqueda, AND y OR para hacer búsquedas a través de Google académico, el repositorio de tesis de la universidad también será una herramienta importante para la búsqueda, así como las bases de datos EBSCO host y ScienceDirect.

Fase 2: Procesamiento de la información

Selección de la información acerca de las metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad social y económica debido a procesos de remoción en masa.

Fase 3: Organización de la información

Organización de las metodologías según el criterio; local, nacional e internacional y a su vez la actualidad de la información, clasificando de la más reciente a la más antigua, en un periodo entre 2000 y 2016, y descripción de cada metodología exponiendo lo que presenta cada autor y el lugar de aplicación de la metodología.

Fase 4: Discusión de resultados

Discusión y comentarios de las metodologías, exponiendo los vacíos de investigación, se mostrará el conocimiento actual de la vulnerabilidad social y económica debido a movimientos de remoción en masa principalmente en Colombia, además, un análisis de la posición de Colombia con respecto a los demás países.

Recopilación y revisión de literatura web

Ecuaciones de búsqueda

La búsqueda estará guiada por una serie de términos que lleven una relación con el problema que se quiere resolver. Al momento de planificar la búsqueda se listan todos los términos relacionados con la investigación, incluyendo un listado de sinónimos. Además, se delimita en una búsqueda local (realizada en el repositorio de la universidad de la Salle), una búsqueda nacional (delimitando estudios realizados en Colombia) y una búsqueda internacional.

Para la presente investigación la búsqueda de información está relacionada con: la búsqueda de metodologías para la evaluación de vulnerabilidad social y/o económica en infraestructura vial debido a movimientos de remoción en masa, en la tabla se presentan los términos relacionados con la búsqueda en bases de datos académicas como Sciencedirect y EBSCOHost.

Tabla 1. Términos de búsqueda.

Búsqueda nacional	Búsqueda internacional
Metodología -Metodologías -Evaluación - Ecuaciones	Methodology - Evaluation
Infraestructura – Carretera – Carreteras – Vías -Vial	Road
Vulnerabilidad	Vulnerability
Social	Social
Económica	Economic
Deslizamiento – Movimiento de remoción en masa	Landslide

Fuente: Autores

Los booleanos escogidos fueron AND y OR, con los cuales se formaron ecuaciones de búsqueda y se seleccionaron las ecuaciones de la tabla por ser las más relevantes, específicas en su expresión y las que obtuvieron menos resultados.

Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda.

Ecuaciones de búsqueda nacional	Resultados
Metodologías OR ecuaciones OR evaluación AND vulnerabilidad AND económica AND social AND infraestructura AND vial AND deslizamientos	8400
Metodologías OR ecuaciones OR evaluación OR metodología AND vulnerabilidad AND económica AND carreteras AND movimientos de remoción en masa	6300
Metodologías OR ecuaciones OR evaluación OR metodología AND vulnerabilidad AND social AND carreteras AND movimientos de remoción en masa	6200
Metodologías OR ecuaciones OR evaluación OR metodología AND vulnerabilidad AND social AND económica AND carreteras AND movimientos de remoción en masa	6020
Ecuaciones de búsqueda internacional	Resultados
Vulnerability AND landslide AND roads	31
Methodology AND vulnerability AND landslide AND roads	4
Methodology AND vulnerability AND landslide AND roads	28
Evaluation AND vulnerability AND landslide and road	7
Vulnerability AND social AND economic AND landslide AND road	2
Vulnerability AND social AND landslide AND road	5
Vulnerability AND economic AND landslide AND road	5

Fuente: Autores.

Organización de la información

Para la organización de la información, se clasifican en locales, nacionales e internacionales.

Locales

Estos corresponden a investigaciones realizadas en la universidad de la Salle (repositorio de la universidad). Al realizar la búsqueda no se encontraron documentos relevantes para la investigación.

Nacionales

Los antecedentes nacionales corresponden a los estudios realizados en Colombia, encontrados con el uso de las ecuaciones de búsqueda ya mencionadas. Se describen 4 estudios que representan relevancia para la investigación.

Metodología para la cuantificación de pérdidas económicas en corredores viales por deslizamientos y avalanchas Caso piloto aplicado a tres tramos de la vía concesionada Bogotá-Villavicencio para deslizamientos superficiales.

En 2012 cuadros y Zambrano en su tesis metodología para la cuantificación de pérdidas económicas en corredores viales por deslizamientos y avalanchas caso piloto aplicado a tres tramos de la vía concesionada Bogotá-Villavicencio para deslizamientos superficiales evaluaron el riesgo económico por deslizamientos y avalanchas en corredores viales, para lo cual crearon una metodología. Los autores parten de una tesis anterior que creó un mapa de amenaza que contempla aspectos geomorfológicos, geológicos y ambientales, mide la susceptibilidad al deslizamiento, y considera la lluvia como su principal detonante; por consiguiente se pudo establecer una zona de influencia a partir de la estimación de la distancia de viaje del deslizamiento, con modelos que relacionan parámetros geotécnicos y topográficos, esto permitió

identificar los elementos expuestos y determinar el nivel de exposición en el que se encuentran, así como estimar el estado físico y consecuente susceptibilidad económica a través de modelos semicuantitativos. La vulnerabilidad económica de los elementos expuestos se estableció a partir del grado de exposición de estos ante el fenómeno amenazante (Índice de exposición IE) y del grado de susceptibilidad económica del elemento en tales circunstancias. Para estimar el valor asociado a cada elemento se utilizó un método de depreciación el cual tiene en cuenta el estado de conservación y mantenimiento del elemento. Conforme al mapa de amenaza existente, la vulnerabilidad económica hallada para cada uno de los elementos expuestos y el costo asociado a cada uno de estos, se obtuvo el riesgo económico.

Dentro de su investigación mencionaron que la vulnerabilidad económica se refiere al nivel de pérdida económica que puede sufrir un elemento expuesto en términos de su exposición y resistencia contra la magnitud de la amenaza (Cuadros A., 2012). También hacen una distinción entre evaluación de daños y la evaluación de la vulnerabilidad. Entonces la vulnerabilidad debe focalizarse en la determinación de aquellos factores que hacen a la población vulnerable y que muestran las mayores diferencias en la susceptibilidad de las personas.

Por consiguiente la evaluación de las pérdidas indirectas se concentraron en tres grupos principales, el primero de ellos son la pérdidas correspondientes a las asumidas por la concesión por el cierre ya sea parcial o total de la vía, que afecta el pago de peajes, el segundo grupo corresponde a las pérdidas que asumen los usuarios de la vía, ya sea tránsito promedio diario (TPD), usuarios transportados diariamente, tipos de carga transportada (productos perecederos y no perecederos) o sobrecostos causados abordar vías alternas. El tercero grupo corresponde a las pérdidas causadas a la población civil que depende económicamente de la correcta transitividad de la vía y de la economía que se genera alrededor de esa por el flujo vehicular.

Cuadros y Zambrano implementaron ecuaciones usadas por Prieto, Ramos y Villadiego en su artículo metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial – aplicación carretera Bogotá - Villavicencio (Colombia). Las ecuaciones se describen en la tabla 3.

Tabla 3 Ecuaciones para estimación de pérdidas de productos perecederos, no perecederos, paralización de mano de obra y por abordar vías alternas.

Variables	Ecuaciones
TAI: Tasa anual de interrupción	<i>Ecuación 1. Pérdidas de productos perecederos.</i>
CPPTA: costos de productos perecederos transportados por año	$perdidas\ productos\ perecederos = TAI * CPPTA$
CP: costos de parada del transporte de productos no perecederos por año	<i>Ecuación 2. Pérdidas de productos no perecederos</i>
TPD: transito promedio diario de camiones que transportan este tipo de productos	$perdidas\ productos\ no\ perecederos = TAI * CP * TPD$
PPC: personas paralizadas por cierre	<i>Ecuación 3. Pérdidas de productividad de la mano de obra.</i>
TPCA: tiempo promedio de cierre anual.	$perdidas\ de\ productividad\ de\ la\ mano\ de\ obra = PPC * TPCA + PPD$
PPD: PIB per cápita diario	
CVA: cantidad de vehículos afectados	<i>Ecuación 4. Pérdidas por abordar vías alternas.</i>
CACR: costos adicionales por cambio de ruta.	$perdidas\ por\ abordar\ vias\ alternas = CVA * CACR$
CCA: costo combustible adicional	
CPA: costo peajes adicionales	<i>Ecuación 5. Costos adicionales por cambio de ruta.</i>
CMA: costo manutención adicional	$CACR = CCA + CPA + CMA + OG$
OG: otros gastos	

Fuente: (Cuadros A., 2012). Ecuaciones de Metodología para la cuantificación de pérdidas económicas en corredores viales por deslizamientos y avalanchas Caso piloto aplicado a tres tramos de la vía concesionada Bogotá-Villavicencio para deslizamientos superficiales.

Para implementar las ecuaciones de la tabla 3 realizaron un análisis económico de la región mediante el diligenciamiento de formatos de inspección visual de los elementos expuestos en los tramos previstos, inspeccionaron algunos indicadores económicos mediante averiguaciones realizadas a los habitantes (área aferente a la vía Bogotá-Villavicencio entre Quetame y Guayabetal), y mediante información suministrada por empleados de la entidad concesionaria, tales como la organización de propiedades, procesos productivos, mercado laboral.

Metodología para evaluación preliminar de riesgo en carreteras por deslizamientos detonados por lluvia.

En el 2011 Hidalgo y Pacheco de Asís proponen una metodología para estimar el riesgo por deslizamiento de taludes en carreteras de zonas tropicales montañosas, que pueda ser usada de forma ágil para evaluaciones preliminares y para sistemas de alerta (Hidalgo C, & Pacheco.A., 2011). La metodología consiste en:

Evaluar la amenaza estableciendo relaciones estadísticas entre la precipitación (agente detonador de los deslizamientos) y la ocurrencia de eventos de inestabilidad para obtener umbrales de falla que permiten identificar, con una cierta confiabilidad, la magnitud y duración de las lluvias que pueden causar deslizamientos.

Estimar la vulnerabilidad por medio de la calificación de atributos relacionados con la exposición de las personas y vehículos, así como por datos estadísticos de fatalidades en la vía.

Se calcula el riesgo como el producto de la probabilidad de falla y la vulnerabilidad, dado como la probabilidad anual de que se produzca una fatalidad en la vía y se compara con el índice ARL (Nivel de riesgo estimado) que se calcula mediante la calificación de los atributos .

Para determinar la vulnerabilidad implementaron una metodología que fue adoptada para la evaluación de riesgo por movimientos de masa en carreteras de Australia (Stewart, 2002). La cual consiste en determinar los parámetros de la tabla 4 y construir matrices donde se relacionen para estimar la vulnerabilidad y el riesgo.

Tabla 4. Variables para evaluación de vulnerabilidad en carreteras.

Variable	Descripción	Escala
L: Indicador de probabilidad de falla.	Probabilidad de que ocurra un evento en cierto periodo de tiempo.	Se clasifica desde L1 hasta L6, siendo L1 la mayor probabilidad anual indicativa.
T: probabilidad temporal	Probabilidad de que un individuo o elemento se encuentre expuesto a la amenaza.	Se clasifica desde T1 hasta T5, siendo T1 la mayor.
V: Probabilidad d que hay una fatalidad	Nivel de preparación de un individuo o elemento que se encuentre expuesto.	Se clasifica desde V1 hasta V5. Los valores asignados a cada rango parten de los daños observados en vehículos y edificios cercanos a la vía.
S: Escala de falla	se determina por medio del volumen de material fallado o por el tamaño máximo de los bloques en el caso de caídas de roca.	Escala entre S1 y S5.
R: Velocidad de falla	Velocidad máxima esperada para el movimiento de remoción en masa.	Escala entre R1 y R3.
M: Magnitud del evento	Combinación de las calificaciones de la escala del evento y de la velocidad de la falla.	Escala entre M1 Y M5.
H: Clasificación de la amenaza	Las calificaciones de la magnitud del evento y de la probabilidad de falla, producen la clasificación de la amenaza al combinarlas mediante una matriz	Se determina desde H1 hasta H5

C: Matriz de consecuencias	Probabilidad temporal de que un individuo esté presente en el momento de la falla. El parámetro C indica el nivel de consecuencias, evaluando las pérdidas económicas por cierres viales.	Se indican estimaciones de costos correspondientes a pérdidas directas e indirectas. Siendo C1 pérdidas > \$1500M y C5 <\$10M,
ARL: Nivel de riesgo	probabilidades de muerte en el tramo de carretera analizado.	ARL1 hasta ARL5, ARL1 representa la mayor probabilidad de muerte.

Fuente: Autores.

Las ilustraciones 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10 presentan tablas con la escala de cada parámetro para la evaluación de vulnerabilidad.

- L1 El evento puede, o es esperado que ocurra dentro de un corto periodo bajo circunstancias promedio, o el mecanismo está activo en el presente (dependiendo de las circunstancias un periodo corto pueden ser de días a no más de 2 o 3 años). La probabilidad anual indicativa es alrededor 0.9
- L2 El evento puede, o es esperado que ocurra dentro de un periodo moderado (de unos pocos años a 30 años) o dentro del próximo periodo de inspección bajo condiciones ligeramente adversas. La probabilidad anual indicativa es alrededor 10^{-1}
- L3 El evento podría ser esperado que ocurra alguna vez dentro de un periodo de 100 años, en el normal curso de los eventos pero solo podría ocurrir dentro del próximo periodo de inspección bajo circunstancias adversas. La probabilidad anual indicativa es 10^{-2}
- L4 El evento podría no ser esperado para ocurrir dentro de un periodo de 100 años bajo condiciones normales y es improbable que ocurra dentro del próximo periodo de inspección excepto bajo condiciones muy adversas. La probabilidad anual indicativa es 10^{-3}
- L5 El evento podría no ser esperado para ocurrir dentro de un periodo de 100 años y es improbable que ocurra dentro del próximo periodo de inspección aún bajo condiciones muy adversas. La probabilidad anual indicativa es 10^{-4}
- L6 El evento es improbable que ocurra aún bajo condiciones extremas. La probabilidad anual indicativa es $<10^{-5}$

Ilustración 1. Indicador de probabilidad de falla.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1.

T1	Usualmente se espera presencia de la persona como parte de la forma normal de uso (Ejemplo edificios residenciales, algunos edificios comerciales). Usuarios de la carretera en la condición más pesada de tránsito urbano ($P > 0.5$)
T2	Se espera que a menudo estén presente la persona como parte de la forma normal de uso (Ejemplo edificios residenciales, algunos edificios comerciales). Usuarios de las vías en las mayores arterias urbanas y en las vías rurales de tráfico más pesado ($P = 0.1 - 0.5$)
T3	Se espera que algunas veces esté presente la persona como parte de la forma normal de uso. Usuarios de las vías en muchas arterias urbanas y en las mayores arterias rurales ($P = 0.01 - 0.1$)
T4	Es improbable que esté presente la persona como parte de la forma normal de uso. Usuarios de las vías suburbanas y arterias rurales menores ($P = 0.001 - 0.01$)
T5	Es muy improbable que esté presente la persona. Usuarios de la mayoría de las vías de tráfico ligero, bermas de las vías etc. ($P < 0.001$)

Ilustración 2. Probabilidad temporal de falla.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1.

-
- V1 Persona al descubierto incapaz de evadir las caídas de rocas y otros detritos (movimientos extremadamente rápidos). Vehículo chocado contra un bloque mayor de 1 m de altura o perdido dentro de un hueco profundo y angosto a velocidad de autopista ($P > 0.5$)
 - V2 Persona al descubierto puede ser capaz de evadir los detritos. Vehículo chocado contra un bloque de 0.5-1 m de altura a velocidad de autopista o mayor a 1 m de altura a velocidad urbana, o perdido dentro de un hueco angosto ($P 0.1-0.5$)
 - V3 La mayoría de la gente al descubierto puede evadir los detritos. Vehículo chocado contra un bloque de 0.5-1 m de altura a velocidad urbana, o un bloque >1 m de altura a baja velocidad. Vehículo impacta detritos de mezclas de suelo y roca seco o húmedo (o cruza superficie escalonada con escalones de 0.1-0.2 m causados por el desarrollo de la falla de un terraplén) a velocidades de autopista ($P=0.01-0.1$)
 - V4 Vehículo choca contra bloques de alrededor de 0.2 m de altura a velocidad de autopista o un bloque de altura 0.5-1 m a baja velocidad. Vehículo impacta detritos de mezclas de suelo y roca seca o húmeda (o cruza superficie escalonada con escalones de 0.1-0.2 m causados por el desarrollo de la falla de un terraplén) a velocidades urbana. Vehículo interactúa con una depresión o hueco superficial donde la barrera de defensa puede prevenir la salida del vehículo de la vía ($P 0.001-0.01$)
 - V5 Vehículo choca contra bloques de alrededor de 0.2 m de altura a velocidad urbana o un bloque de tamaño menor a velocidad de autopista. Vehículo impacta detritos de mezclas de suelo y roca seco o húmedo a baja velocidad. Vehículo atraviesa una superficie irregular formada por suelo o pequeñas rocas (<100 mm de dimensión mínima) o por una falla desarrollada en un terraplén a velocidades de autopista ($P < 0.001$)
-

Ilustración 3. Probabilidad de que haya una fatalidad.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1.

Nota: Velocidad de autopista=100-110 km/h, urbana=60-80 km/h, baja=20-30 km/h.

Tabla 5. Escala de la falla

	Volumen (m ³)	Tamaño de bloque (m)
S1	>20000	1.0 (Dimensión mínima)
S2	>2000	1.0 (Dimensión máxima)
S3	>200	<1.0 (Dimensión máxima)
S4	>20	<0.5 (Dimensión máxima)
S5	<20	<0.2 (Dimensión máxima)

Ilustración 4. Escala de falla.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1.

Tabla 6. Ponderación de la velocidad de falla

	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica
R1	Extremamente rápido	5×10^3	5 m/s
R1	Muy rápido	5×10^3	5 m/s
R2	Rápido	5×10^1	3 m/s
R3	Moderado	5×10^{-1}	1.8 m/h

Ilustración 5. Velocidad de falla.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1.

Tabla 7. Calificación de la magnitud del evento



		Escala de la falla				
Velocidad de falla		S5	S4	S3	S2	S1
Rápido   Lento	R1	M3	M2	M2	M1	M1
	R2	M4	M3	M2	M2	M1
	R3	M4	M4	M3	M2	M2
	R4	M5	M4	M4	M3	M2
	R5	M5	M5	M4	M4	M3

Ilustración 6. Magnitud del evento.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1

Tabla 8. Calificación de la amenaza

Probabilidad	Magnitud del evento				
	M5	M4	M3	M2	M1
L1	H3	H2	H2	H1	H1
L2	H4	H3	H2	H2	H1
L3	H4	H4	H3	H2	H2
L4	H5	H4	H4	H3	H2
L5	H5	H5	H4	H4	H3
L6	H5	H5	H5	H4	H4

Ilustración 8. Clasificación de la amenaza.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1

Tabla 9. Matriz de consecuencias

Vulnerabilidad	Probabilidad temporal de que un individuo esté presente en el momento de la falla				
	T5	T4	T3	T2	T1
V1	C4	C3	C2	C1	C1
V2	C4	C3	C2	C1	C1
V3	C5	C4	C3	C2	C2
V4	C5	C5	C4	C3	C3
V5	C5	C5	C5	C4	C4

Ilustración 7. Matriz de consecuencias.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1

Tabla 11. Niveles de riesgo evaluado (Wilson et al., 2005)

Nivel de riesgo evaluado	Probabilidad anual de muerte
ARL1	$>3 \times 10^{-3}$
ARL2	3×10^{-4} a 3×10^{-5}
ARL3	3×10^{-5} a 3×10^{-6}
ARL4	3×10^{-6} a 3×10^{-7}
ARL5	$<3 \times 10^{-7}$

Ilustración 9. Niveles de riesgo.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1

Tabla 10. Calificación del nivel de consecuencias (Modificada de Stewart et al., 2002)

C1	Cierre total de una carretera troncal o doble calzada por un periodo extendido. Daños mayores de infraestructuras o propiedades (Diferentes a carreteras). Interrupción muy costosa (Diferente al que los usuarios de la vía). Costos de reparación muy altos. (costo directo e indirecto >\$1500M
C2	Cierre total de un carril de de una carretera troncal o doble calzada o cierre total de una carretera secundaria por un periodo extendido. Daños sustanciales de infraestructuras o propiedades (Diferentes a carreteras). Grandes costos de la interrupción (Diferente al que los usuarios de la vía). Costos de reparación muy altos. (costo directo e indirecto >\$200M<1500M
C3	Cierre total de una carretera secundaria por un periodo corto, un periodo largo se puede aceptar si hay alternativas razonables disponibles. Daños moderados de infraestructuras o propiedades (Diferentes a carreteras). Costos moderados de la interrupción (Diferente al que los usuarios de la vía). Costos de reparación moderados. (costo directo e indirecto >\$50M<200 M
C4	Cierre total o parcial de una carretera secundaria por un periodo corto. Daños menores de infraestructuras o propiedades (Diferentes a carreteras). Costos menores de la interrupción (Diferente al que los usuarios de la vía). Costos de reparación bajos. (costo directo e indirecto >\$10M<50 M
C5	Cierre total o parcial de una carretera terciaria por un periodo corto. Daños de infraestructuras o propiedades despreciables (Diferentes a carreteras). Costos bajos o despreciables de la interrupción (Diferente al que los usuarios de la vía). Costos de reparación bajos o sin costos. (costo directo e indirecto <\$10M

Ilustración 10. Calificación del nivel de riesgo de consecuencias.

Fuente: (Stewart, 2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis Version 3.1

Los autores mencionan que Stewart & Buys (2005) indican que taludes con niveles de riesgo ARL1 y ARL2 generalmente deben ser remediados, aunque si en los sitios se presenta predominantemente riesgo de pérdidas económicas más que de vidas, se pueden implementar programas de manejo a largo plazo. Los sitios con niveles ARL3, que en principio no requieren remediación, pero en los cuales es posible que el nivel de riesgo se incremente con el tiempo, se debe implementar un sistema de manejo o de gerenciamiento. Para este último caso, el sistema de gerenciamiento puede ser de tipo genérico, pero en el caso de taludes de alto riesgo (niveles ARL1 y ARL2) se deben diseñar sistemas de manejo específicos para cada sitio. Estos autores también proponen que el objetivo de diseño de los sistemas de gerenciamiento y de remediación para vías existentes deben ser tales que permitan mantener el nivel de riesgo menor o igual que ARL3.

La metodología fue utilizada para evaluar el riesgo en varios taludes de la Conexión Vial Aburrá-Cauca. Esta vía une el valle de Aburrá con los municipios de san Jerónimo, Santa Fé de Antioquia y la carretera que conduce a Urabá tiene una longitud de 39.4 km y consta de cuatro tramos.

La metodología mostró una forma de estimar el riesgo de que se presenten fatalidades en una carretera, combinando el uso de umbrales de falla para determinar la amenaza y de calificaciones a diferentes variables de la vulnerabilidad de los usuarios de la carretera para establecerla.

Metodología para la Evaluación de Riesgo en Corredores Viales

En 2011 Sánchez y Urrego en su tesis metodología para la evaluación de riesgo en corredores viales, establecieron que el riesgo depende la susceptibilidad, amenaza y vulnerabilidad, de modo que elaboraron una matriz de susceptibilidad, la cual tuvo en cuenta los elementos condicionantes (la geomorfología, la geología y el uso del suelo), y elementos detonantes, que

para el caso estudio fue a deslizamientos superficiales y profundos inducidos por lluvia. A partir de la matriz de susceptibilidad se generaron rangos de amenaza para deslizamientos superficiales y profundos inducidos por lluvia.

Con los rangos de amenaza elaboraron un mapa de amenaza, el cual definió cada una de las áreas con diferentes valores de amenaza.

Después realizaron una aproximación de los costos directos, estos son la reparación o reconstrucción de la vía, de las viviendas aledañas y los costos de reposición de los vehículos perdidos, los cuales dependen del tipo de daño; cosmético (Son aquellos daños que requieren arreglos menores y que son de tipo netamente operativo), funcional (Son aquellos daños que causan una reparación del elemento expuesto) y estructural (Son aquellos daños que causan una reconstrucción total del elemento expuesto). También evaluaron los costos indirectos que están relacionados directamente con la vulnerabilidad social que se refiere a la cantidad de pérdida de vidas humanas y la vulnerabilidad económica que tiene en cuenta las pérdidas que se pueden presentar para los transportadores de carga si la carretera se cierra. Para la vulnerabilidad económica agruparon las principales pérdidas que se pueden presentar en las carreteras colombianas, agricultura, ganadería y mercancías. También asumieron que si el daño era estructural se perdería lo que se transportaba en un día, en cambio si el daño fuese funcional o cosmético la carretera tardaría algunas horas en reabrirse por lo que las pérdidas no serían significativas y sería mucho más difícil de cuantificar. Las ecuaciones implementadas se describen en la tabla 5.

Tabla 5. Ecuaciones para pérdidas de agricultura, ganadería y mercancías.

Variable	Ecuación
<p>NP: Número de personas en la hora pico</p> <p>#VeCaHp: Número de vehículos por cada categoría (Autos, Bus, C2 a C5) en la hora pico.</p> <p>#Pocu: Número promedio de ocupantes de cada vehículo</p>	<p><i>Ecuación 6. Número de personas en hora pico.</i></p> $NP = \#VeCaHp * \#Pocu$
<p>L: longitud del tramo homogéneo (Km)</p> <p>VOP: velocidad de operación promedio.</p>	<p><i>Ecuación 7. Exposición.</i></p> $Expocisión = \frac{L}{VOP}$
<p>NUA: número de usuarios afectados</p>	<p><i>Ecuación 8. Número de usuarios afectados.</i></p> $NUA = NP * Expocisión$
<p>PPA: Perdidas de productos agrícolas</p> <p>\$TonPro: Precio Tonelada Producto Agrícola.</p> <p>#TonDia: Numero de Toneladas del producto Transportadas en un día.</p> <p>COV: Costo de Operación del vehículo de cada Categoría por día.</p> <p>#VeCa: Numero de Vehículos de Carga de cada categoría.</p>	<p><i>Ecuación 9. Pérdidas de productos agrícolas.</i></p> $PPA = (\$TonPro * TonDia) + (COV * \#VeCa)$

PG: Pérdida de Ganado

\$TonGan: Precio Tonelada Ganado

#TonDia: Numero de Toneladas de Ganado Transportadas en un día

COV: Costo de Operación del vehículo de cada Categoría por día

#VeCa: Numero de Vehículos de Carga por cada categoría.

Ecuación 10. Pérdidas de ganadería.

$$PG = (\$TonGan * TonDia) + (COV * \#VeCa)$$

Mer: Pérdida de mercancías

\$TonMer: Precio Tonelada Mercancías

#TonDia: Número de Toneladas de Mercancías Transportadas en un día

t: Tiempo de Cierre - Se asume como tiempo mínimo de pérdidas un día

i: Tasa de Interés Comercial del Capital

COV: Costo de Operación del vehículo de cada Categoría por día

#VeCa: Número de Vehículos de Carga por cada categoría.

Ecuación 11. Pérdidas de mercancías.

$$PM = (\$TonMer * \#TonDia * t * i) + (COV * VeCa)$$

Fuente: (Sánchez. C., Urrego. L., 2011) Ecuaciones de metodología para evaluación de riesgo en corredores viales.

La guía metodológica se aplicó a cuatro sectores continuos del proyecto de la segunda calzada entre Bogotá y Villavicencio (Colombia). Estos sectores fueron el sector 3, 3A, 4 y 4A, los cuales comprenden entre la quebrada Naranjal hasta la quebrada Chirajara una longitud aproximada de 14 Km.

Los autores concluyen que la metodología permite tener un panorama completo del riesgo para cada tramo de vía, evaluar las pérdidas económicas directas que se podrían presentar si se materializa la amenaza, las pérdidas de vidas humanas, las pérdidas de viviendas aledañas, las

consecuencias económicas de tener cerrada la carretera y esto calificarlo con el fin de determinar las acciones que se deben tomar para mitigar el riesgo de cada elemento expuesto. El modelo no incluye el riesgo por flujos de detritos o avalanchas a lo largo de las quebradas que atraviesan el corredor vial.

Metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial – aplicación carretera Bogotá – Villavicencio (Colombia)

En el 2006 Prieto, Ramos y Villadiego en su artículo metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial – aplicación carretera Bogotá - Villavicencio (Colombia)¹ sugirieron una metodología para realizar curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial.

Dentro de esta metodología plantearon una aproximación en el cálculo de las pérdidas indirectas. Para lo anterior, recopilaron información sobre las condiciones geométricas de la carretera, estado superficial y geología, con el fin de sectorizar la carretera en tramos relativamente homogéneos. También buscaron datos sobre la productividad de la carretera (tránsito promedio diario, cantidad de personas que se transportan por la vía, productos perecederos y no perecederos transportados por la vía), tiempos de cierre total de la vía, dineros puestos en la vía y registros de lluvias. Luego estimaron las pérdidas directas e indirectas.

Para evaluar las pérdidas indirectas usaron las ecuaciones de la tabla 6.

Tabla 6. Ecuaciones de pérdidas de mano de obra paralizada, productos perecederos y peajes no recibidos.

Variable	Ecuación
Numero de cierres al año	<p><i>Ecuación 12. Tasa anual de interrupción para cada tramo.</i></p> $\text{Tasa anual de interrupción} = \frac{\text{Numero de cierres en el año}}{365 \text{ días}} * 100$
costo de productos perecederos transportados por año	<p><i>Ecuación 13. Productos perecederos.</i></p> $\text{productos perecedero} = \text{Tasa anual de interrupción} * \text{costo de productos perecederos transportados por año}$
Número de personas paralizadas	
Tiempo promedio de cierre anual(días)	<p><i>Ecuación 14. Mano de obra paralizada.</i></p>
Costo de productos perecederos transportados por año	$\text{Mano de obra paralizada} = \text{Numero de personas paralizadas} * \text{cierres totales} * \text{tiempo promedio de cierre anual (días)} * \left(\frac{\text{PIB}}{365}\right) \text{ costo de productos perecederos transportados por año}$
TPD	
Tasa anual de interrupción mayor a 24 horas	<p><i>Ecuación 15. Peajes no recibidos.</i></p>
costo de peaje	$\text{Peajes no recibidos} = \text{TPD} * \text{tasa anual de interrupción mayor a 24 horas} * \text{costo de peaje}$

Fuente: (Prieto.A, 2006) Ecuaciones de Metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial – aplicación carretera Bogotá – Villavicencio (Colombia)

NOTA: Los autores aclaran que la carretera Bogotá - Villavicencio está concesionada a una entidad privada. En el contrato de concesión se especifican unos ingresos mínimos por peajes. Si

no se alcanzan esos ingresos mínimos, el estado se ve obligado a retribuirle a la entidad privada el faltante, por lo que finalmente el dinero que se deje de percibir por disminución de tráfico es una pérdida que debe pagar la sociedad. En caso de que el contrato de concesión de la carretera no contemple ingresos mínimos por peajes, este aspecto debería excluirse de la estimación de las pérdidas indirectas (Prieto.A, 2006).

Costos de reposición de la vía

Para obtener el costo de construcción o valor de reposición a nuevo de cada tramo se pueden seguir dos alternativas. La primera, es una metodología estándar utilizada por la entidad gubernamental que cuantifique el patrimonio vial del país y la segunda, es en los casos en que no se pueda utilizar un procedimiento similar, ya sea porque no existe, o porque no es aplicable a la totalidad de la infraestructura vial, entonces es necesario remitirse directamente a los contratos de construcción de la carretera.

Luego establecieron que la lluvia actúa como detonante en la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, entonces relacionaron la precipitación promedio mensual multianual acumulada desde el inicio de la estación seca con el acumulado de las pérdidas promedio valoradas también desde el inicio de la estación seca, para obtener una curva de vulnerabilidad por lluvias.

Los autores afirmaron que las curvas de vulnerabilidad son una herramienta para la gestión de carreteras, ya que permiten tener un panorama de lo que ha pasado, y da idea de los dineros que deben apropiarse cada año para mantener los mismos niveles de transitabilidad. Al estar la vía separada en tramos homogéneos, las curvas pueden utilizarse para dar una idea donde se presenta la mayor vulnerabilidad y de esta misma forma tomar decisiones sobre los niveles de inversiones

que se deben hacer para disminuir las pérdidas, tanto directas como indirectas. Adicionalmente, estas curvas son una herramienta fundamental para elaborar estudios de riesgo.

Finalmente concluyeron que la vulnerabilidad depende directamente de la deformabilidad y adicionalmente de la fragilidad de los materiales e inversamente de la resistencia. También recomiendan sectorizar la red vial nacional en función de la Vulnerabilidad Económica ya que es un indicador coherente y tangible para la gestión de construcción y operación de carreteras.

Antecedentes internacionales

Se describen dos estudios relevantes para la investigación, uno realizado en Escocia y otro en España.

The Economic Impact of Landslides and Floods on the Road Network. Mike G Winter, Barbara Shearer, Derek Palmer, David Peeling, Clare Harmer and Jonathan Sharpe. 2016

Describen parte de un estudio para evaluar los impactos económicos de eventos seleccionados de flujo de escombros en Escocia, basado en el esquema establecido por Winter y Bromhead (2012), quienes resumen los impactos económicos por eventos de deslizamientos en tres categorías:

- **Impactos económicos directos:** incluyen los costos directos de limpieza y reparación / reemplazo de objetos perdidos / dañados infraestructura en el sentido más amplio y los costos de búsqueda y rescate. Estos deberían ser relativamente fáciles para obtener o estimar cualquier evento dado.

- **Impactos económicos consecuentes directos:** estos generalmente se relacionan con la 'interrupción de la infraestructura' y son realmente sobre la pérdida de utilidad. Por ejemplo, los costos de cerrar una carretera o implementar un solo carril durante un período determinado con

una desviación dada, son relativamente simples de estimar utilizando modelos bien establecidos. Asumen que aunque la causa de estudio son los deslizamientos, el problema radica en el cierre total o parcial de la vía, por lo que implementan QUeues And Delays at ROadworks (QUADRO), este es un programa que estima los efectos de las obras en términos de tiempo de viaje, operación de vehículos y costos de accidentes en los usuarios de la sección de carretera afectada. Estos cambios en los costos de los usuarios se monetizan junto con los cambios en los ingresos por impuestos indirectos y las emisiones de dióxido de carbono. Los trabajos de obras viales individuales se pueden combinar para producir el costo total de mantener el camino a lo largo del tiempo. Su uso principal es en zonas rurales (TAME Software Site, 2020).

Para este estudio evaluaron los parámetros de la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de evaluación para costos consecuentes directos.

Variables	Ecuaciones
Número de vehículos dañados	Administraciones Viales pertinentes.
tráfico diario promedio anual (AADT),	Administraciones Viales pertinentes. Cuando la información no estaba disponible (por ejemplo, anchos de carril y borde), los valores predeterminados sugeridos en se adoptó el manual de QUADRO.
Tipo de cierre	Administraciones Viales pertinentes.
Duración de cierre (días)	Administraciones Viales pertinentes.
Costo de retraso	QUADRO calcula los costos de demoras y desvíos de usuarios, emisiones de carbono de vehículos y accidentes asociados con las obras viales, informando los costos sobre la base de un día promedio durante una semana completa.
Costo de carbono	
Costo del accidente	
Longitud (kilómetros)	La herramienta QDIV (QUADRO Diversion) se utilizó para modelar las rutas de diversión estándar utilizado por el operador de la carretera. Para cada evento, se desarrolló un esquema simplificado de red de diversión y se utilizó Google Maps para medir la longitud de cada enlace.

Fuente: Autores.

•**Impactos indirectos:** los deslizamientos de tierra afectan el acceso a zonas rurales remotas con economías que se basan en actividades dependientes del transporte y, por lo tanto, la vulnerabilidad puede ser extensa y está determinada por la red de transporte en lugar del evento en sí. Si una ruta dada es cerrada por un largo período, entonces, afecta los negocios locales, manufactura y agricultura (por ejemplo, silvicultura en el oeste de Escocia) es una preocupación ya que el acceso a los mercados es limitado, los costos de acceso aumentan y las ganancias comerciales se ven afectadas, la viabilidad a corto y largo plazo puede ser adversamente afectado. Estos son los costos más difíciles de determinar ya que generalmente están ampliamente dispersos tanto geográficamente como socialmente.

Para su evaluación realizaron una encuesta de empresas en el área del evento. Esto es tan solo una parte de una primera fase de trabajo para determinar la disponibilidad y confiabilidad de los datos que serían necesarios para identificar y desarrollar una metodología de medición de los impactos económicos indirectos de deslizamientos de tierra en Escocia.

Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debido a procesos geomorfológicos.

En el 2006 Bonachea presenta en su tesis doctoral un procedimiento para evaluar de forma cuantitativa el riesgo por deslizamientos, teniendo en cuenta la peligrosidad, los elementos expuestos y su vulnerabilidad.

En el capítulo 3 expuso definiciones de vulnerabilidad de diferentes autores, lo que le permitió concluir que la mayor parte de los trabajos que abordan este tema están de acuerdo en la expresión de la vulnerabilidad (de 0 a 1), pero los criterios mostrados para su evaluación son muy diversos y tienen cierta subjetividad. Además, mencionó las formas en que pueden hacerse

mejores aproximaciones, de las cuales destacó mejorar la obtención de datos sobre daños pasados (tipo de elementos afectados, daños experimentados por cada tipo de elemento, etc.) y una mejor caracterización de los elementos existentes, de su valor y de su probable comportamiento ante movimientos futuros es posible hacer mejores aproximaciones de la vulnerabilidad que involucra pérdidas directas. También menciona que es necesario considerar las consecuencias indirectas producidas por los movimientos en masa, que pueden ser incluso superiores a las directas.

Metodología

Elaboró un modelo de susceptibilidad a los deslizamientos a partir del análisis de movimientos pasados y utilizando técnicas estadísticas logró hacer extrapolaciones sobre el comportamiento futuro. A partir del modelo de susceptibilidad construyó un modelo de peligrosidad. Por otro lado, el análisis de los daños producidos en el pasado por el tipo de movimiento considerado permitió determinar qué elementos han sufrido daños, su valor y cuáles han sido esos daños (qué y cuánto es afectado). Finalmente, de la integración de los modelos de peligrosidad, valor de un elemento determinado y su vulnerabilidad, obtuvo un modelo de riesgo directo e indirecto específico para cada elemento afectado.

Para la generación de modelos el autor utilizó las variables: pendientes, fallas, cauces, litología y usos del suelo.

También creo una base de datos de la infraestructura vial para asignar a cada tramo de vía su valor por metro y pérdidas. Los atributos fueron; nombre de la vía, clase de la vía, longitud, número de vehículos.

El autor diferencia la forma de estimar la vulnerabilidad directa e indirecta. Para la vulnerabilidad directa utilizó la siguiente expresión.

Ecuación 16. Vulnerabilidad directa.

$$V = \frac{\textit{perdidas a un deslizamiento de determinado tipo y magnitud en el elemento}}{\textit{Valor del elemento}}$$

Los términos de la expresión fueron transformados a precios actuales.

También incluyó en la vulnerabilidad directa los daños a personas, considerando a todas las personas por igual (sexo, edad, capacidad productiva, etc.) y la determinó con la siguiente expresión:

Ecuación 17. Vulnerabilidad directa a los daños a personas.

$$V = \frac{\textit{Nº afectados o fallecidos debidos a deslizamientos(durante el periodo analizado)}}{\textit{poblacion total}}$$

Para la estimación de las pérdidas indirectas existe una dificultad mayor, ya que es escasa la experiencia en este ámbito. Sin embargo, teniendo en cuenta la actividad económica de la zona y de acuerdo con datos empíricos de efectos producidos por deslizamientos en el pasado, las potenciales pérdidas indirectas se calcularon con las ecuaciones de la tabla 8.

Tabla 8. Ecuaciones para pérdidas debido a pérdida de tiempo no laborable y aumento de distancia.

Variables	Ecuaciones
Número de trabajadores afectados por hora	<p style="text-align: center;"><i>Ecuación 18. Pérdidas indirectas debido a la pérdida de tiempo laborable.</i></p>
Coste de un trabajador por hora	<p style="text-align: center;"><i>perdidas debidas a la perdida de tiempo laborable</i></p> <p style="text-align: center;"><i>= N° de trabajadores afectados por hora</i></p>
Duración de la interrupción	<p style="text-align: center;"><i>* coste de un trabajador por hora(€/h)</i></p> <p style="text-align: center;"><i>* duracion de la interrupción (h)</i></p>
Longitud adicional del camino alternativo	
Número de vehículos afectados por hora	<p style="text-align: center;"><i>Ecuación 19. Pérdidas indirectas debido al aumento de distancia.</i></p>
Coste por Km adicional	<p style="text-align: center;"><i>perdidas debidas al aumento de distancia</i></p> <p style="text-align: center;"><i>= [longitud adicional del camino alternativo</i></p>
Retraso por incremento de tiempo	<p style="text-align: center;"><i>* N° de vehiculos afectados por hora</i></p> <p style="text-align: center;"><i>* coste por km adicional]</i></p> <p style="text-align: center;"><i>+ retraso por incremento de tiempo</i></p>

Número de
vehículos por hora

Ecuación 20. Número de trabajadores afectados por hora.

Número de
personas por
vehículo

N° de trabajadores afectados por hora

= N° de vehiculos por hora

Tasa de actividad
en la zona

**** N° de personas por vehiculo***

**** Tasa de actividad en la zona***

Población activa
mayor de 16 años

Ecuación 21. Tasa de actividad en la zona.

Tasa de actividad en la zona

Población total
mayor de 16 años

= $\frac{\text{poblacion activa mayor de 16 años}}{\text{poblacion total mayor de 16 años}} * 100$

Salario medio
mensual de un
trabajador

Ecuación 22. Costo de un trabajador por hora.

costo de un trabajador por hora

Número de horas
mensuales
trabajadas

= $\frac{\text{salario medio mensual de un trabajador}}{\text{N° de horas mensuales trabajadas}}$

Fuente: (Bonachea, 2006) Ecuaciones de Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debido a procesos geomorfológicos.

A partir del mapa de infraestructuras, dividido en sectores que muestran la intensidad media diaria de vehículos, se puede obtener el número de vehículos por hora que pasan por el sector (salvo en el caso del tren). Evidentemente, no sería lo mismo si la interrupción se produjese durante la noche que si se produjera en las horas de mayor intensidad de tráfico. En este trabajo se consideró un promedio diario.

Por otro lado, cada trabajador supone un coste diario para el empresario y si el trabajador sufre un retraso, teóricamente genera unas pérdidas a la empresa.

A partir de los datos obtenidos de eventos pasados se puede estimar el periodo de tiempo que las distintas infraestructuras podrían quedar bloqueadas. La interrupción del tráfico en la autopista suele ser pequeña, ya que lo más habitual es que se habilite uno de los carriles del otro sentido. En carreteras nacionales y regionales la interrupción suele ser mayor puesto que es necesario retirar el material que obstaculiza la vía o bien acondicionar vías alternativas. En las carreteras locales cuando se produce un deslizamiento suelen quedar interrumpidas, dependiendo del lugar, durante periodos de tiempo superiores como consecuencia de las labores de restauración y, dado que el tráfico es escaso en éstas, tampoco existe una rapidez extrema para ponerla otra vez en funcionamiento. Dentro de este tipo de efectos indirectos no se han considerado las pérdidas por retrasos en mercancías (p. ej. productos perecederos), ni tampoco el efecto sobre personas que supuestamente no trabajan, pero que producen riqueza ya que gastan sus ahorros en servicios de distinto tipo, o que sufren pérdidas económicas por retrasos (P., 2006). Tampoco se consideran los efectos indirectos que se producen incluso a grandes distancias de donde se produce el evento, que en algunos casos pueden ser muy superiores a todos los anteriores (p. ej. industrias que deben parar su producción porque no les ha llegado un determinado material). La incorporación de estos factores al análisis requiere profundizar en algunos aspectos que no se abordaron en esta metodología.

Colombia frente a otros países Latinoamericanos

Para evaluar el estado de Colombia frente a otros países se tienen en cuenta las zonas montañosas tropicales, ya que son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra debido a que generalmente, se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su

ocurrencia tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.

Principalmente se evalúan las zonas pertenecientes a la cordillera de los Andes, conformada por Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia.

La tabla 9 muestra el número de desastres por remoción en masa en cada país Andino, en un periodo entre 1901-2001, realizada por La Base de Datos Internacional de Desastres EM-DAT en 2011.

La EM-DAT considera solo eventos con al menos 10 víctimas mortales, 100 personas afectadas, la solicitud de ayuda internacional y/o la declaración de estado de emergencia. Sin embargo, los datos pueden estar sesgados por una cantidad significativa de desastres no considerados. También brinda información sobre la cantidad de personas afectadas y el daño económico asociado; sin embargo, la información es incompleta y no abierta públicamente.

Tabla 9. Número de desastres por remoción en masa y víctimas fatales en cada país Andino, periodo 1901-2011.

País	n.º de eventos (R)	n.º de víctimas fatales (F)	Relación F/R	País	n.º de eventos (R)	n.º de víctimas fatales (F)	Relación F/R
Argentina	3	79	26,33	Ecuador	13	1,106	85,08
Bolivia	6	218	36,33	Perú	33	10,512	318,54
Chile	4	229	57,25	Venezuela	4	164	41
Colombia	41	3,171	77,34	Total	104	15,479	

Fuente: EM-DAT 2011.

Según el reporte de la EM-DAT Colombia ha sido el país donde se han presentado mayores eventos de deslizamientos con 43 eventos entre 1901 y 2011, luego Ecuador y Perú con 33 eventos.

Argentina

Los Andes en Argentina abarcan un tercio de su territorio y las principales ciudades capitales se localizan en el extremo opuesto sobre la costa Atlántica, asociadas a los antiguos puertos o a

las pampas húmedas. Las provincias occidentales que forman parte del ambiente montañoso andino presentan sus capitales en el sector del pie de monte de los Andes. Este aspecto es fundamental en el reducido impacto que tienen los procesos de remoción en masa en Argentina, sin embargo, las vías de conexión estratégicamente importantes son afectadas frecuentemente, en particular la ruta internacional n.º 7 que conecta a Mendoza con Chile central, la cual es clave para el desarrollo del Mercosur.

Bolivia

Bolivia es atravesada por dos cordilleras (la occidental y la oriental o real) que forman parte de la cadena montañosa de los Andes. Debido a esta diversidad en el relieve, en el país se generan múltiples fenómenos climáticos y a su vez, estos fenómenos ocasionan una amenaza específica para cada región. En las regiones del altiplano, la llanura y el escudo brasileño se presentan constantemente inundaciones, sequías y deslizamientos, mientras que en las cordilleras y en la zona sub andina se presentan frecuentes deslizamientos, inundaciones y actividad sísmica moderada.

Chile

La expansión urbana del sector oriente de Santiago involucra zonas ubicadas en abanicos aluviales de quebradas, donde se depositan materiales transportados durante eventos de remoción en masa que ocurren en la montaña. Estos fenómenos corresponden al tipo de peligro geológico más común en la zona precordillerana de la Región Metropolitana. No existe a nivel del país una metodología que permita unificar criterios de evaluación del peligro de remociones en masa para conformar un instrumento de ordenamiento territorial. Los estudios y las zonificaciones

existentes se basan fundamentalmente en la observación y efectos de eventos anteriores.
(Castillo, 2007).

Ecuador

En la costa, sierra y en la región oriental ocurren deslizamientos porque Ecuador es un país montañoso. La mayoría se presenta durante las estaciones lluviosas. Cuando el suelo recibe una gran cantidad de agua, la tierra se ablanda y se desprende formando flujos de lodo, que se precipitan pendiente a bajo. Los derrumbes son accidentes frecuentes -114 inventariados de 1900 a 1988-, muy puntuales, que afectan a barrios construidos en pendientes fuertes. Los derrumbes llevan a su paso viviendas o encierran aquellas que se encuentran hacia abajo. Además, se en temporadas de lluvia se presentan varios cierres viales por derrumbes en las vías.

Perú

El Perú es un país ubicado en el flanco occidental de América del Sur, que a raíz de la presencia de la Cordillera de los Andes y de la Corriente marina de aguas frías, Corriente Peruana, cuenta con distintos climas, paisajes, ecosistemas y biodiversidad a nivel de flora y fauna.

Presenta varias amenazas a la población, en la costa, los principales peligros son los sismos y tsunamis. En zonas altoandinas, la población está expuesta a los efectos de las heladas que afectan sus cultivos con mucha frecuencia y las bajas temperaturas afectan la salud de la población porque sus viviendas son precarias y no les otorgan protección ante climas extremos. También hay muchos centros poblados que están expuestos al impacto de movimientos en masa (huaycos, deslizamientos, etc.), que son eventos recurrentes que se activan por las lluvias que ocurren entre diciembre y marzo de cada año.

Los huacos se producen principalmente en las microcuencas de las vertientes oriental y occidental de la cordillera de los Andes peruanos, siendo más destructivos en los valles que vierten hacia el océano Pacífico. En esta parte de los Andes, donde se encuentra Lima Metropolitana, existen suelos muy erosionables por estar conformados por sedimentos y depósitos no consolidados, y poca vegetación. Estos suelos, al saturarse por las aguas provenientes de las precipitaciones, se licúan y se desprenden de las laderas, formando un alud de rocas y lodo, que alcanza grandes velocidades y posee un alto poder destructivo. La mayoría de las infraestructuras viales discurren por los fondos de los valles cortando las quebradas y pasando sobre los conos de depósito. El ejemplo más claro lo tenemos en la Carretera Central, que cada año sufre cortes por los huacos que se producen desde el puente de Los Ángeles en adelante, en dirección a La Oroya.

Aunque estos países también se enfrentan a los fenómenos de remoción en masa, no se encuentran documentos con metodologías claras para la evaluación de la vulnerabilidad en el ámbito social y económico debido a los cierres viales causados por estos eventos en la infraestructura vial de cada país.

Discusión de resultados

En la tabla 10 se presenta un resumen de la recopilación de metodologías, cuatro a nivel nacional, tres de ellas aplicadas en la vía Bogotá – Villavicencio y una en la conexión vial Aburrá – Cauca. En el ámbito internacional se evalúan dos metodologías, una aplicada a una carretera en España y otra con caso de aplicación en Escocia.

Tabla 10. Resumen de metodologías

NACIONALES						
Título	Autores	Año	Ubicación	¿Qué evaluaron?	¿Cómo lo hicieron?	Vacíos en la investigación
Metodología para la cuantificación de pérdidas económicas en corredores viales por deslizamientos y avalanchas Caso piloto aplicado a tres tramos de la vía concesionada Bogotá-Villavicencio para deslizamientos superficiales.	Angela Yohanna Cuadros, Sergio Andrés Zambrano	2012	Vía concesionada Bogotá-Villavicencio	Perdidas de productos perecederos y no perecederos Perdidas por mano de obra paralizada Perdidas por tomar vías alternas	En la tabla 2 se presentan las ecuaciones implementadas. Además, realizaron un análisis económico de la región mediante la inspección de algunos indicadores económicos mediante averiguaciones realizadas a los habitantes e información suministrada por la entidad concesionaria.	Inconvenientes para adquirir datos históricos de inversiones y pérdidas económicas, es necesario tener información exacta y verídica para que el resultado de la metodología sea confiable.
Metodología para evaluación preliminar de riesgo en carreteras por deslizamientos detonados por lluvia.	Cesar Augusto Hidalgo, André Assis	2011	Conexión Vial Aburrá-Cauca.	La vulnerabilidad como el nivel de preparación de un individuo o elemento que se encuentre expuesto. El nivel de consecuencias evaluando las pérdidas económicas por cierres viales.	Emplean la metodología de (Stewart, 2002), la cual asigna valores de probabilidad a ciertos parámetros expuestos en la tabla 3.	Las calificaciones de las tablas son atribuidas a criterio del evaluador por lo tanto puede existir la tendencia a subvalorar la exposición y el impacto del movimiento de masa

Metodología para la Evaluación de Riesgo en Corredores Viales	Cesar Eduardo Sánchez, Luis Fernando Urrego	2011	Segunda calzada entre Bogotá y Villavicencio	Perdidas de productos agrícolas Perdidas ganadería Perdidas mercancías	En la tabla 4. se presentan las ecuaciones implementadas. Para productos agrícolas se utiliza el principal producto transportado por la carretera. Para el ganado utilizan datos de FEDEGAN. Para las mercancías solo se estima las perdidas por retrasos.	La estimación de las perdidas depende del daño, para un daño estructural se perdería lo que se transportaba en un día, en cambio si el daño fuese funcional o cosmético la carretera tardaría algunas horas en reabrirse por lo que las pérdidas no serían significativas y sería mucho más difícil de cuantificar.
Metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial – aplicación carretera Bogotá – Villavicencio (Colombia)	José Alonso Prieto, Alfonso Mariano Ramos, José Ricardo Villadiego	2006	Vía Bogotá - Villavicencio	Perdidas de productos perecederos Perdidas por mano de obra paralizada Perdidas peajes no recibidos	En la tabla 5 se presentan las ecuaciones implementadas. Además, buscaron datos sobre la productividad de la carretera (tránsito promedio diario, cantidad de personas que se transportan por la vía, productos perecederos y no perecederos transportados por la vía)	No se tienen en cuenta perdidas de productos no perecederos. Es necesario contar con datos verídicos en cuanto a los costos de los productos para que la metodología sea confiable.
INTERNACIONALES						

Título	Autores	Año	Ubicación	¿Qué evaluaron?	¿Cómo lo hicieron?	Vacíos en la investigación
The Economic Impact of Landslides and Floods on the Road Network.	Mike G Winter, Barbara Shearer, Derek Palmer, David Peeling, Clare Harmer and Jonathan Sharpe	2016	Escocia	Costo de retraso Costo de carbono Costo del accidente	QQueues And Delays at ROadworks(QUADRO), es un programa que estima los efectos de las obras en términos de tiempo de viaje, operación de vehículos y costos de accidentes en los usuarios de la sección de carretera afectada. QUADRO calcula los costos de demoras y desvíos de usuarios, emisiones de carbono de vehículos y accidentes asociados con las obras viales, informando los costos sobre la base de un día promedio durante una semana completa.	La afectación de negocios locales, manufactura, agricultura y acceso a los mercados es importante, ya que, los costos de acceso aumentan. Estos costos son más difíciles de determinar ya que generalmente están ampliamente dispersos tanto geográficamente como socialmente.
Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debido a procesos geomorfológicos.	Jaime Bonachea Pico	2006	España	Perdidas debidas a la pérdida de tiempo laborable Perdidas debido al aumento de distancia	Con la recopilación de eventos históricos y la implementación de las ecuaciones de la tabla 6.	No se consideran las pérdidas por retrasos en mercancías, ni se consideran los efectos a grandes distancias de donde se produce el evento.

Fuente: Autores.

Los autores consultados coinciden en que la vulnerabilidad es un factor indispensable para medir el riesgo, lo que impide que se construya una metodología que evalúe únicamente la vulnerabilidad sin asociar otros componentes del riesgo como la amenaza, la exposición y la susceptibilidad.

De acuerdo con (Hidalgo C, & Pacheco.A., 2011) la vulnerabilidad está relacionada directamente con la exposición a la amenaza, de hecho, la vulnerabilidad se considera como el nivel de preparación de un individuo o elemento ante un evento de remoción en masa, medido de forma cualitativa en un rango entre V1 a V5, siendo V1 la mayor vulnerabilidad y V5 la menor vulnerabilidad, para determinarla es necesario conocer la probabilidad de falla, la magnitud del evento y la velocidad de falla, para poder clasificar la amenaza y determinar el nivel de consecuencias C, que varía entre C1 Y C5 siendo C1 el escenario con consecuencias más desfavorables. El nivel de consecuencias tiene en cuenta costos directos e indirectos, los cuales se determinan según el periodo de los cierres viales y el tipo de vía, para vías primarias se estiman mayores pérdidas y para vías terciarias menores perdidas.

Por otra parte (Sánchez. C., Urrego. L., 2011) relacionan la vulnerabilidad social (pérdida de vidas humanas) con los costos indirectos y la vulnerabilidad económica la entienden como las pérdidas que se pueden presentar para los transportadores de carga si la carretera se cierra.

(Prieto.A, 2006) concluyeron que la vulnerabilidad depende directamente de la deformabilidad y adicionalmente de la fragilidad de los materiales e inversamente de la resistencia. Algo importante es sectorizar la red vial nacional en función de la vulnerabilidad económica ya que es un indicador coherente y tangible para la gestión de construcción y operación de carreteras.

(Mike G Winter, 2016) evaluaron eventos de deslizamientos en una carretera rural de Escocia, esta al igual que en varias carreteras de Colombia presenta varios eventos de deslizamientos que generan cierres viales y grandes pérdidas económicas. En su caso de estudio citan a (Winter, M.G. & Bromhead., 2012), para clasificar las pérdidas de costos consecuentes directos y los indirectos. Para estos últimos coincide con los autores colombianos, al presentar dificultad en estimar la vulnerabilidad económica indirecta y también afirma que esta genera mayor afectación.

(Bonachea, 2006) coincide con en que la estimación de las pérdidas indirectas se presenta cierta dificultad, ya que es escasa la experiencia en este ámbito.

En general para lograr una aproximación a la evaluación de la vulnerabilidad se deben estimar las pérdidas indirectas que se muestran en la tabla 9.

En la tabla 11 también se evidencian las principales dificultades que tiene Colombia para estimar pérdidas indirectas. Existen otras variables de estudio, pero estas son las más mencionadas en la literatura consultada.

Tabla 11. Pérdidas indirectas para considerar

Transporte de productos perecederos (alimentos)	La cantidad de productos perecederos transportados es una estimación, por lo cual no es un dato exacto y genera alteraciones en el cálculo de esta. Además, Colombia no cuenta con un control regular de transporte de productos perecederos para cada vía.
Transporte de productos no perecederos (mercancía, ganado y otras importantes según la zona de estudio)	Colombia no cuenta con un control regular de transporte de productos no perecederos para cada vía. Es necesario evaluar las principales actividades económicas de los tramos de vía afectados frecuentemente.

Recorridos de vías alternas (retrasos en tiempo, gasolina)	Algunas de las vías más afectadas por deslizamientos en Colombia no presentan rutas alternas.
Peajes no recibidos	Si la vía es concesionada y en el contrato de se especifican unos ingresos mínimos por peajes, el estado se ve obligado a retribuirle a la entidad privada el faltante, por lo que finalmente el dinero que se deje de percibir por disminución de tráfico es una pérdida que debe pagar la sociedad. En caso de que el contrato de concesión de la carretera no contemple ingresos mínimos por peajes, este aspecto debería excluirse de la estimación de las pérdidas indirectas (Prieto.A, 2006).
Turismo	
Pérdida en la producción por retraso en la entrega de materias primas	En la literatura no se encuentra una forma de estimar este tipo de pérdidas.
Mercados locales	
Mano de obra paralizada	Estimar el número de personas paralizadas es difícil, ya que no sé cuenta con un registro confiable que pueda ser consultado.

Fuente: Autores.

Conclusiones y recomendaciones

Este estado del arte presenta diferentes metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad social y económica. Es importante tener en cuenta que la definición de vulnerabilidad en las metodologías varía según el país y la zona de aplicación, sin embargo, un factor común es la dificultad para su evaluación ya que es poco el conocimiento que se tiene en este ámbito, evidencia de esto es que en el periodo comprendido entre 2002 y 2016 son pocos los estudios realizados en materia de vulnerabilidad a nivel social y económico. Lo que permite concluir que en Colombia existen pocos estudios de vulnerabilidad aplicados a corredores viales.

En la bibliografía consultada se encontraron estudios de amenaza, a los cuales se califica el riesgo de manera cualitativa, pero la vulnerabilidad sigue siendo un desafío.

Existe una deficiencia notable en el país en relación con la evaluación de vulnerabilidad, Invias realizó estudios al respecto como: Evaluación y reducción de la vulnerabilidad de la red vial Nacional y su Red Alternativa, así como Estudio de evaluación de riesgos de la red vial nacional, implementación y puesta en marcha del sistema de evaluación de riesgos; Sin embargo, no existe un marco instrumental metodológico para evaluación de vulnerabilidad social y económica adecuado.

No es posible hablar de vulnerabilidad sin mencionar riesgo, por lo que el estudio de la amenaza (movimientos de remoción en masa) es fundamental para determinar la vulnerabilidad.

Las metodologías coinciden en que la evaluación de las pérdidas humanas no debe ser cuantificada en términos económicos. Por otro lado, las pérdidas indirectas se asocian a las pérdidas económicas por los cierres viales, algunas metodologías incluyen la evaluación de pérdidas por mercancías, ganado, peajes, mientras que otras solo incluyen daños a vehículos y

pérdidas por retrasos e implementación de vías alternas, es decir, que las metodologías no evalúan los mismos parámetros y en algunos casos solo se tiene en cuenta la vulnerabilidad económica. La vulnerabilidad social presenta mayores retos debido a la poca experiencia y a la escasa información que las entidades públicas y privadas pueden brindar para su estudio, por lo que solo se ha evaluado cualitativamente.

En general se recomienda tener una mejor definición de vulnerabilidad, conocer la amenaza y generar bases de datos con información relevante sobre las mercancías transportadas y la economía de cada sector expuesto a la amenaza.

Finalmente, esta investigación será una herramienta útil para que futuros estudios logren la construcción de una metodología, que a su vez podrá ser un instrumento útil en la gestión del riesgo, ya que permitiría tener indicadores para determinar el nivel de vulnerabilidad, lo que posibilita la proporción de herramientas suficientes para establecer un plan de acción y respuesta y estrategias de eliminación, reducción y mitigación del riesgo.

ANEXOS

Tabla 12. Investigaciones descartadas.

INVESTIGACIONES DESCARTADAS						
Título	Autores	Año	Ubicación	¿Qué evaluaron?	¿Cómo lo hicieron?	¿Porque no se tiene en cuenta en nuestra investigación?
Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa	Guillermo Eduardo Ávila Álvarez. Carlos Eduardo Cubillos Peña. Alejandro Edilberto Granados Becerra. Enif Medina Bello. Édgar Alexander Rodríguez Castiblanco. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda. Gloria Lucía Ruiz Peña.	2016		Identificación y localización de los elementos expuestos. Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia. Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad.	La base para la identificación y localización de los elementos expuestos fue la información predial o catastral presentada en el levantamiento topográfico, de acuerdo con los insumos mínimos para la elaboración de estudios detallados de amenaza y riesgo.	Es una guía metodológica para realizar estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local.

Evaluación del escenario de vulnerabilidad física, social, económica y ambiental en el barrio Carlos Pizarro : Soacha	Camila Andrea López Gómez Yiceth Yuliana Triana Sánchez	2018	Barrio carlos pizarro: soacha	Se evaluaron escenarios de vulnerabilidad a través de una medición de tipo cualitativo y cuantitativo aplicando los factores físicos, sociales, económicos y ambientales en el barrio Carlos Pizarro, Soacha.	Realizaron una recopilación de información que permitiera evaluar la vulnerabilidad. Además, se realizaron varias encuestas que permitiera evaluar de forma cuantitativa los indicadores físicos, económicos, sociales y ambientales. Finalmente se realizó una localización donde se presentan los indicadores de vulnerabilidad física.	En nuestra investigación no se tiene en cuenta porque el escenario de evaluación de la vulnerabilidad no fue realizado en una infraestructura vial.
Evaluación del riesgo por inestabilidad de laderas.	Aldo O. Oliva González. Javier A. González	2015	Mexico	Diagnosticar, modelar y evaluar el riesgo por inestabilidad de laderas.	Realización de trabajos de exploración y muestreo para caracterizar geológica y geotécnicamente el área de estudio, determinar el perfil estratigráfico detallado del subsuelo y obtener muestras representativas.	En nuestra investigación no se tiene en cuenta porque el escenario de evaluación de la vulnerabilidad no fue realizado en una infraestructura vial.

Análisis espacial de las condiciones de vulnerabilidad social, económica, física y ambiental en el territorio colombiano.	Carlos Alberto Durán Gil	2017	Colombia	Determinar, cuantificar y categorizar la vulnerabilidad en sus dimensiones social, económica, física y ambiental, y caracterizar la suma de estas como vulnerabilidad total.	Se realizó la selección de acuerdo con la revisión de trabajos conceptuales, analíticos y aplicados al tema de la vulnerabilidad.	Aunque determina la vulnerabilidad a nivel social y económica, es solo una revisión conceptual y no se realiza la evaluación en infraestructura vial.
Natural hazards & the risks they pose to South-East Queensland	Hayne, M., Michael-Leiba, M., Gordon,.	2003	Australia	La vulnerabilidad, dependerá de la naturaleza de los elementos en riesgo, de su posición, velocidad, magnitud y volumen del deslizamiento, etc., se obtiene para tres tipos de elementos expuestos: personas, edificios y carreteras	Se consideran el número de personas, edificios y kilómetros de carreteras existentes, así como las pérdidas esperadas para cada elemento en 100 años. Por ejemplo, en el caso de que un edificio sea totalmente destruido su vulnerabilidad es $V = 1$, si es la mitad del edificio entonces será $V = 0,5$. Los valores de vulnerabilidad estimados oscilan entre 0,9 y 0,05, para personas; 1,0 y 0,25 para edificios; 1,0 y 0,3 para carreteras. A partir de estos datos se obtienen los mapas de riesgo específico y total.	No se evalúa la vulnerabilidad a nivel social y económico. La dimensión de esta investigación corresponde a daños directos y no indirectos.

<p>Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movements: Working toward a better risk perception</p>	<p>Leone F, Asté J.P, Leori E.</p>	<p>1996</p>	<p>Francia</p>	<p>Proponen un marco explícito para estructurar el concepto de vulnerabilidad, mediante el uso de matrices de daños. La vulnerabilidad de cada elemento es diferente y depende de distintos factores (físicos, sociológicos, técnicos, características del deslizamiento, etc.). Además, consideran fundamental analizar los efectos producidos por los deslizamientos en el pasado para realizar un estudio de la vulnerabilidad.</p>	<p>Clasifican los elementos vulnerables afectados con diferentes grados de intensidad de daños (mínimo I - máximo V), a los cuales asignan diferentes valores de vulnerabilidad. En el caso de las personas, para una intensidad de daños 1, la vulnerabilidad es 0,001; por el contrario, para una intensidad de daños 5 (equivalente a fallecimiento de las personas) este valor de vulnerabilidad es 1. En función de estos parámetros y del valor económico de mercado, del valor económico práctico, del valor funcional y del valor humano, se le asigna un valor de vulnerabilidad a cada tipo de elemento.</p>	<p>La investigación no está dentro del margen de años estipulado, además, el escenario para su aplicación no es una carretera.</p>
<p>Landslide risk assessment and acceptable risk.</p>	<p>Fell</p>	<p>1994</p>	<p>Tienen en cuenta que la vulnerabilidad de las propiedades es diferente a la vulnerabilidad de las personas. La vulnerabilidad será distinta si en el edificio habita gente o no, si la gente es anciana, si duerme cuando ocurre el deslizamiento, etc,</p>	<p>Asigna valores de vulnerabilidad por pérdidas en propiedades a las clases de deslizamientos propuestas por Varnes (1978) en función de su magnitud</p>	<p>No tienen en cuenta elementos vulnerables como: edificios, personas y terrenos, sin embargo, no tienen presente la vulnerabilidad indirecta.</p>	

Fuente: Autores.

Bibliografía

Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*. Bogotá.

Banco Mundial. (2012). *Gestión de riesgos de desastres en Colombia*. Bogotá.

Bell., P. (2012). *Colombia a Commercial and Industrial Handbook*. Colombia: Editorial Nomos S.A.

Bonachea, J. (2006). *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos*. España.

CEPAL. (2005). *Elementos conceptuales para la prevención y reducción de daños originados por amenazas socionaturales*. Santiago de Chile: LOM ediciones.

CEPAL. (2005). *Elementos conceptuales para la prevención y reducción de daños originados por amenazas socionaturales*. Santiago de Chile: LOM ediciones.

CEPAL. (2005). *Elementos conceptuales para la prevención y reducción de daños originados por amenazas socionaturales*. Santiago de Chile: LOM ediciones.

Cuadros A., Z. S. (2012). Metodología para la cuantificación de pérdidas económicas en corredores viales por deslizamientos y avalanchas “ Caso piloto aplicado a tres tramos de la vía concesionada Bogotá-Villavicencio para deslizamientos superficiales”. *Universidad Javeriana*, 102.

DINERO. (18 de Junio de 2019). Colombia: ¡bloqueada otra vez! Bogotá, Colombia.

- Foschiatti, A. M. (2002). Vulnerabilidad global y pobreza consideraciones conceptuales. *Vulnerabilidad global y pobreza*, 10.
- Garzón, J. V. E. (2012). Evaluación de la vulnerabilidad y consecuencias por deslizamiento en la conexión vial Aburrá-río del Cauca entre las abscisas km 04+000 y km39+000. *Universidad de Medellín*, 83.
- Hidalgo C, & Pacheco, A. (2011). Metodología para evaluación preliminar de riesgo en carreteras por deslizamientos detonados por lluvia. *Universidad de Medellín*, 10.
- Martínez, Lacoste, Hernández, Romero, Pulido. (2015). *La red vial primaria de Colombia frente al cambio climático*. Bogotá: Ediprint Ltda.
- P., B. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. *Universidad de Cantabria*, 122.
- Pizarro, R. (2001). *La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Prieto, A. M. R. (2006). Metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial- aplicación carretera Bogotá-Villavicencio. *Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.*, 15.
- Sánchez, C., U. L. (2011). Metodología para la evaluación de riesgo en corredores viales. *Universidad Javeriana*, 120.
- SIAC. (16 de Marzo de 2011). *sistema de información ambiental de Colombia SIAC*. Obtenido de <http://www.siac.gov.co/ninoynina>

Stewart, L. B. (2002). The RTA Guide to Slope Risk Analysis . *Aust Geomechanics 3.1*, 115-148.

SUAREZ, J. (1998). *DESLIZAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS TROPICALES*. BUCARAMANGA, COLOMBIA: EDICIONES UIS.

Taboada, D. ., (1998). Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. *física de la tierra*, 113.

Toussain, J. F. (1993). Evolución geologica de Colombia. *SciELO*, 221.

UNGDR. (2017). *Terminología sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes*. Bogotá.

un-spider. (2014). Obtenido de <http://www.un-spider.org/es/riesgos-y-desastres/gestion-del-riesgo-de-desastres>

Vallverdu, A. (2010). Pavimentos en infraestructura vial. *EMB CONSTRUCCIÓN*, 1.

Borja C, Alcántara I. (2003). Mass movement processes and associated risks in Zacapoaxtla, Puebla. *SciELO*, 1.

Castillo, M. L. (2007). METODOLOGIA PARA LA EVALUACION Y ZONIFICACION DE PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA CON APLICACION EN QUEBRADA SAN RAMON, SANTIAGO ORIENTE, REGION METROPOLITANA. *Universidad de Chile*.

- PNUD. (2006-2007). Plan de Reconstrucción y Reducción de Riesgos del departamento de Solola, Basado en el Plan de Desarrollo Sostenible. *Plan de Reconstrucción y Reducción de Riesgos*, 3.
- Fell. (1994). Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 261-272.
- Gómez, M. J. (08 de 05 de 2020). *Centro de lecura, escritura y oralidad en español univrsidad de los Andes*. Obtenido de <https://leo.uniandes.edu.co/images/Guias/Estadodelarte.pdf>
- Hayne, M., Michael-Leiba, M., Gordon,. (2003). Natural hazards & the risks they pose to South-East Queensland. *Australian Geological Survey Organisation*.
- Leone F, Asté J.P, Leori E. (1996). Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movements: Working toward a better risk perception. *Glissements Derterrain*, 263-269.

