

# METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE CURVAS DE VULNERABILIDAD ECONÓMICA POR LLUVIA PARA INFRAESTRUCTURA VIAL – APLICACIÓN CARRETERA BOGOTÁ - VILLAVICENCIO (COLOMBIA)<sup>1</sup>

Jorge Alonso Prieto S.<sup>2</sup>, Alfonso Mariano Ramos C.<sup>3</sup>, José Ricardo Villadiego B<sup>4</sup>

Resumen: Se sugiere una metodología para obtener las curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para carreteras y el caso de aplicación a la carretera Bogotá – Villavicencio en Colombia. Una curva de vulnerabilidad económica por lluvia se define aquí como aquella que expresa el cociente entre las pérdidas y costo de construcción para cada nivel de lluvia que genera dichas pérdidas. Estas curvas pueden ser utilizadas como herramienta de gestión de infraestructura vial, ya que permiten por un lado, obtener una idea de la apropiación de recursos que debe tener una carretera para seguir con los niveles de tránsito específicos y por otro lado, identificar claramente tramos en donde se han presentado problemas fuertes y en donde se requiere una intervención mayor. Una curva de vulnerabilidad permite evaluar el riesgo económico cuando se integra con la amenaza por lluvia. Se menciona que ésta debería ser una herramienta dinámica en el tiempo, ya que las curvas de vulnerabilidad económica permitirían saber si las gestiones realizadas por las entidades encargadas del mantenimiento de la carretera están obteniendo resultados satisfactorios en su administración por la disminución en éste indicador. La metodología fue implementada en la vía Bogotá – Villavicencio, que es una de las más importantes en Colombia por ser corredor de intercambio de productos agroindustriales y manufacturados entre el centro de Colombia y los Llanos Orientales.

**Palabras clave:** avalúo de riesgo para carreteras, carretera Bogotá–Villavicencio, pérdidas en carreteras, vulnerabilidad de un sistema vial, vulnerabilidad económica.

## METHODOLOGY TO ESTIMATE ECONOMIC VULNERABILITY CURVES BY RAINFALL FOR ROAD RELATED INFRASTRUCTURE. AN APPLICATION ON THE BOGOTÁ - VILLAVICENCIO ROAD (COLOMBIA)

Abstract: A methodology to obtain the economic vulnerability produced by rainfall on roads, including a specific application for the Bogotá–Villavicencio highway in Colombia, is proposed here. A curve of economic vulnerability due to rainfall shows the ratio between losses and the construction costs for different levels of rainfall. These curves can be used as tools for management of road-related infrastructure. The usefulness of a vulnerability plot is two-fold: First, it permits to know the level of monetary resources that a road must receive in order to keep its level of service; second, it identifies critical road sectors where a major intervention is expected. A vulnerability curve permits to estimate the economic risk throughout its integration with the hazard due to rainfall. Since a decrease of the economic vulnerability of a sector in time would suggest successful managerial decisions, vulnerability estimation should be a dynamic tool. The methodology was applied to the Bogotá–Villavicencio road, which is a significant passageway for agricultural and manufactured products between the eastern plains and the central region of Colombia.

**Keywords:** economic vulnerability, losses in roads, Bogotá–Villavicencio road, road risk assessment, vulnerability of road networks.

<sup>1</sup> Artículo recibido el 5 de agosto de 2006 y aceptado para publicación el 28 de septiembre de 2006.

<sup>2</sup> Profesor Asociado, MSc, PhD, Director del Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. E-mail: [j.prieto@javeriana.edu.co](mailto:j.prieto@javeriana.edu.co)

<sup>3</sup> Profesor Asistente, MSc, Subdirector del Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. E-mail: [a-ramos@javeriana.edu.co](mailto:a-ramos@javeriana.edu.co)

<sup>4</sup> Jefe de oficina de Atención de Emergencias del Instituto Nacional de Vías. Bogotá, Colombia.

## INTRODUCCIÓN

En los países en vía de desarrollo, la construcción, mantenimiento y operación de la infraestructura vial es de vital importancia para el crecimiento económico de la región. De la buena práctica que se siga al asignar recursos económicos a la infraestructura vial dependerá el mejoramiento en el nivel de vida de los habitantes de la zona. El desconocimiento de las pérdidas por el deterioro de las carreteras hace que los daños aumenten y los impactos negativos se incrementen de forma drástica. Por tanto, es necesario desarrollar instrumentos que permitan por un lado establecer prioridades para la asignación de los escasos recursos disponibles, y por otro facilitar estrategias de diseños optimizados y labores de prevención y control. Una obra optimizada social y económicamente es aquella que tiene en cuenta no solamente los costos iniciales de construcción, sino también los costos esperados de falla, los cuales se relacionan con el *riesgo*. Este último depende de la integración de las amenazas con las vulnerabilidades. Los análisis de ingeniería que incluyen el concepto de riesgo son entonces la herramienta más poderosa que existe para la toma de decisiones informadas y óptimas social y económicamente.

Con el fin de clarificar conceptos, a continuación se simplifican y adoptan los siguientes términos, siguiendo las definiciones introducidas por UNDRO (1979), EERI (1984, 1989) y Coburn et al. (1994), así:

*Amenaza*: Probabilidad o frecuencia de ocurrencia de un evento que puede causar daño. En este caso, nos referimos a la probabilidad o frecuencia esperada de un nivel de lluvia. También se puede entender como el nivel de lluvia esperado para una probabilidad o frecuencia dada.

*Vulnerabilidad*: Pérdida social o económica promedio debido a la ocurrencia de un solo evento que tiene el potencial de causar daño (en este caso lluvia). Usualmente se expresa como un porcentaje del valor de construcción del bien. Naturalmente la vulnerabilidad está asociada, en términos físicos, de manera directa con la deformación permanente y de forma inversa con la resistencia de los materiales. Nótese entonces que una mayor amenaza (nivel más elevado de lluvias) no necesariamente produce una vulnerabilidad más alta cuando se comparan varias obras diferentes (obras en distintos materiales) ya que las obras compuestas de materiales menos deformables tendrán una vulnerabilidad menor para un mismo valor de amenaza. Por otro lado, para una obra civil específica (el mismo material) la vulnerabilidad *si* aumenta con la amenaza (nivel de lluvia). Por tanto, una curva de vulnerabilidad para una obra específica, o tipo de material dado, expresa la variación entre el porcentaje de pérdida y el nivel de lluvia.

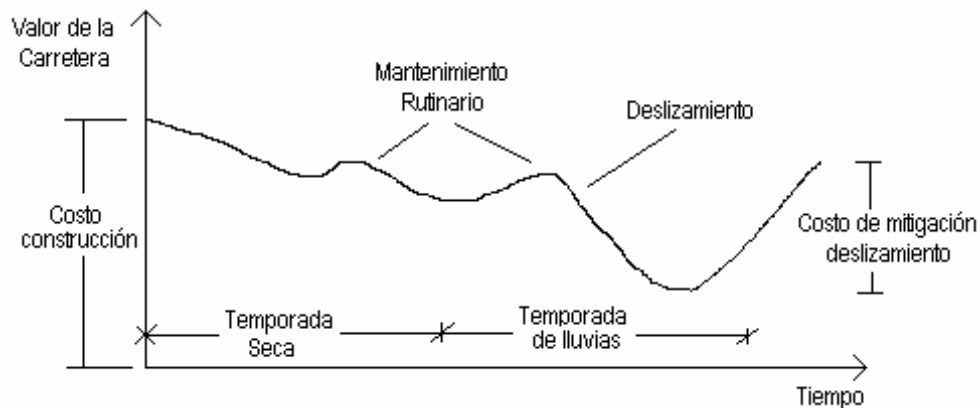
*Riesgo*: Pérdida social o económica promedio anual debido a la ocurrencia de todos los eventos posibles que pueden causar daño (pérdida promedio anual para todos los niveles de lluvias). El riesgo anual para una obra existente, en la que hay estadísticas sobre pérdidas del pasado, puede calcularse como la pérdida esperada o promedio multianual de pérdidas. Para un diseño, o para el desarrollo de medidas correctivas, el riesgo anual puede calcularse, determinando primero la amenaza o frecuencia de distintos niveles de lluvias, y luego promediando los valores de la vulnerabilidad (pérdida por un solo nivel de lluvia) con las respectivas frecuencias de ocurrencia de todas las lluvias. En otros términos, el riesgo para obras futuras e inversiones en obras remediales se calcula promediando las vulnerabilidades con la amenaza.

Es entonces claro que para poder evaluar el riesgo esperado en las nuevas obras, o en las soluciones que se plantean a diversos problemas de inestabilidades en carreteras, es necesario conocer tanto la amenaza como la vulnerabilidad. La amenaza o curva de frecuencias de diversos niveles de lluvia en una zona puede determinarse siguiendo los métodos disponibles en Hidrología. Por otro lado, en Colombia y seguramente en muchas partes del mundo, no existen curvas de vulnerabilidad económica por lluvias para carreteras, siendo el interés de la presente investigación mostrar tanto una metodología para la obtención de las mismas así como también las primeras curvas en la región. Se evaluaron tanto las curvas de vulnerabilidad como el riesgo para diversos tramos de la carretera Bogotá – Villavicencio.

En la Figura 1 se muestran de forma cualitativa y esquemática las diferentes etapas por las que puede pasar un tramo de carretera en función del tiempo, relacionado con el valor de la carretera.

En un primer momento, el valor de la carretera corresponde al costo de construcción cuando su condición es la mejor. A medida que pasa el tiempo la carretera va perdiendo su valor debido al tránsito de los vehículos, es decir el valor disminuye solamente por el uso normal por lo cual consideramos aquí que se está generando una pérdida. Esta pérdida la consideramos como el costo del mantenimiento periódico o rutinario, después del cual el valor de la carretera aumenta. Es posible que debido a una temporada invernal, los taludes de la carretera lleguen al equilibrio límite y fallen. En este evento, el valor de la carretera disminuye ostensiblemente. El costo de reparación de la carretera y el costo de mitigación de los daños generados por el deslizamiento debido al fenómeno de remoción en masa es el valor de la

pérdida debido a este suceso. La suma de los costos de mantenimiento periódicos y de los eventos como deslizamientos, se consideró aquí como las pérdidas directas totales.



**Figura 1: Etapas en función del costo por las que puede pasar un tramo de una carretera.**

A diferencia de trabajos realizados con denominaciones similares en el área de transporte (Dalziell y Nicholson, 2001; Berdica, 2002; Jenelius et al., 2006) donde se ha tratado el tema de vulnerabilidad física y riesgo de una red de carreteras, este artículo pretende entregar una aproximación a la cuantificación del riesgo y la vulnerabilidad económica de una manera que no ha sido abordada por investigadores anteriores. En general, no se realizan extrapolaciones con análisis estadísticos para eventos de lluvias o dineros invertidos que no se han presentado en la ventana de tiempo considerada, y la metodología es aplicable a una sola carretera. El análisis comparativo de diferentes carreteras con estos indicadores de riesgo y vulnerabilidad económica, permitirá contrastar resultados y observar diferencias y dependencias de la vulnerabilidad con los niveles de lluvia, condiciones geométricas y características geológico-geotécnicas propias de cada carretera.

## **DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EVALUACIÓN DE LAS CURVAS DE VULNERABILIDAD ECONÓMICA POR LLUVIA**

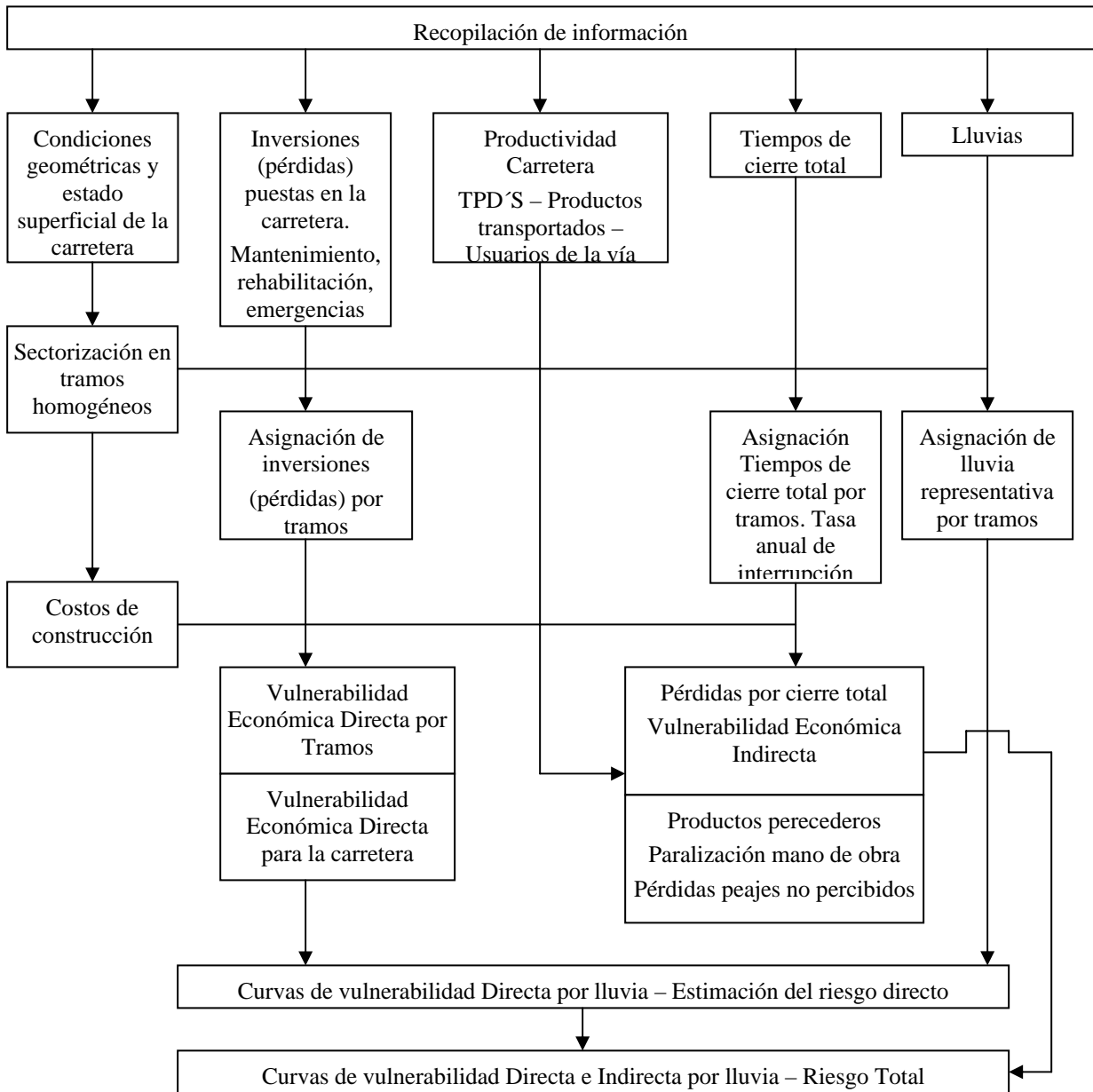
A continuación se presenta la metodología desarrollada para obtener tanto las curvas de vulnerabilidad por lluvia, como el riesgo en una carretera. En la Figura 2 se muestra un esquema de los insumos necesarios y pasos a seguir.

La forma como se cuantificará tanto la vulnerabilidad como el riesgo, es por medio de los dineros puestos en la carretera por concepto de obras y acciones de mitigación de eventos no previstos que a su vez representan las pérdidas de la carreteras, unido con costos en mantenimiento rutinario y preventivo ya que estos últimos se generan debido al desgaste natural por el paso del tiempo y del flujo vehicular. El desgaste normal es considerado aquí una pérdida sufrida por la carretera que es cuantificada en términos económicos por medio del costo de mantenimiento rutinario.

**Recopilación de información:** En primer lugar se debe realizar una recopilación y depuración de información consistente en: condiciones geométricas de la carretera, estado superficial, productividad de la carretera (tránsito promedio diario, cantidad de personas que se transportan por la vía, productos percederos y no percederos transportados por la vía), tiempos de cierre total de la vía, dineros puestos en la vía y registros de lluvias.

**Sectorización de la vía:** Se procede a sectorizar la carretera en tramos relativamente homogéneos con base en las condiciones geométricas (alineamiento horizontal y vertical), el estado superficial y las características geológicas de la carretera. Ésta información puede ser suministrada por la entidad estatal encargada del mantenimiento y operación de la vía.

**Pérdidas directas:** Es necesario asignar los dineros puestos en la carretera a cada tramo homogéneo. A estos dineros se les denominará pérdidas directas. Es importante contar con la fecha de inicio y finalización de cada contrato, así como el objeto específico de cada contrato. Se analiza información de los años disponibles y los valores de los contratos se ajustaron a valor constante del año 2004, utilizando las variaciones anuales del salario mínimo mensual vigente en Colombia. Se pueden utilizar otros métodos para ajustar las cifras a valores constantes de un año deseado.



**Figura 2: Esquema para hallar las curvas de vulnerabilidad económica por lluvia de una carretera.**

Pérdidas indirectas: Las pérdidas indirectas son aquellas que están siendo trasladadas a la comunidad. Las pérdidas indirectas son un reflejo de la disminución en la productividad de la carretera, y por tanto inciden en el crecimiento económico del país.

Con base en los datos de cierre total se calcula la tasa anual de interrupción para cada tramo, definida como el número promedio de días de cierre total por año dividido entre 365 días y multiplicado por 100. Para calcular las pérdidas indirectas por cierre total se procede a estimar la productividad de la carretera. La productividad se calcula con base en la información de Tránsito Promedio Diario (TPD), número de pasajeros que viajan y la cantidad de carga transportada por la vía. Es necesario establecer claras diferencias entre los productos percederos y no percederos, ya que en el momento en que se presente un cierre total de vía, los productos percederos son los que se van a perder, es decir ya no serán negociables por la misma cantidad de dinero debido al deterioro en su calidad. Lo anterior es válido siempre y cuando no existan tramos alternos de comunicación. El caso extremo será cuando la duración del cierre total de vía sea de tal duración que los productos finalmente no puedan ser comercializados.

La pérdida por productos perecederos no transportados se obtiene multiplicando la tasa anual de interrupción por el costo de productos perecederos transportados por año. La pérdida por paralización de mano de obra se obtiene estimando el número de personas paralizadas por los cierres totales, a lo que se le multiplica el tiempo promedio de cierre anual en días por el PIB per cápita diario. El Producto Interno Bruto per cápita para Colombia, por ejemplo, fue de 1765 dólares para el año 2003, es decir el producto interno bruto per cápita por día fue  $1765/365$  dólares = 4.84 dólares. Los anteriores estimativos suponen que cada una de las personas que dejan de ser productivas por el cierre de la vía, devengan un salario mínimo diario vigente, ya que durante estos años el PIB per cápita diario y el salario mínimo diario legal vigente fueron muy parecidos.

La pérdida por peajes no percibidos se puede obtener multiplicando el TPD por la tasa anual de interrupción mayor a 24 horas y por el costo del peaje. En este punto es importante aclarar 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 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.

### **Costo de construcción de la vía – Valor nuevo de reposición**

Para obtener el costo de construcción o valor de reposición a nuevo de cada tramo se pueden seguir dos alternativas. La primera, depende de la existencia de una metodología estándar ampliamente utilizada por la entidad gubernamental que cuantifique el patrimonio vial del país. Este es el caso en Colombia, donde el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 1996) tiene un procedimiento para calcular el costo de construcción de un kilómetro de vía dependiendo del tipo de terreno, tipo de superficie y número de carriles. 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, es necesario remitirse directamente a los contratos de construcción de la carretera. Se debe tener en cuenta no solo la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto (CCMTCA), sino también otro tipo de infraestructura tales como túneles, puentes y viaductos. Es importante mencionar que dependiendo de la organización y los procesos de sistematización de la información en la entidad encargada de la infraestructura vial, es más o menos difícil consolidar los costos de construcción y las inversiones puestas en la carretera. Claramente, los valores de los contratos de construcción deben ajustarse a dinero constante de un año especificado.

### **Riesgo**

Riesgo por pérdidas directas: Las pérdidas directas promedio anuales dividida entre el costo de construcción definen el riesgo por pérdidas directas. Para la obtención del promedio anual de pérdidas se utiliza la media aritmética de las pérdidas ajustadas a dinero constante de una año de referencia (en este caso fue el 2004) correspondientes a los datos disponibles.

Riesgo por pérdidas indirectas: Con las pérdidas promedio anuales indirectas y el costo de reposición a nuevo de cada tramo de la carretera se obtiene el riesgo por pérdidas indirectas. El promedio anual se evalúa con la media aritmética de los valores ajustados en dinero constante, de manera análoga como se mencionó para las pérdidas directas.

Como se ha observado el riesgo en una vía se puede estimar cuando existe información estadística de pérdidas a través de los años. Sin embargo, en los problemas de diseño y optimización económica en vías existentes o futuras usualmente no se dispone de información estadística. Por tanto, es necesario seguir el procedimiento de evaluar primero la amenaza por lluvias, conocer la vulnerabilidad para distintos niveles de amenaza y finalmente realizar la integración para obtener el riesgo. En la siguiente sección se indica un procedimiento para evaluar las curvas de vulnerabilidad.

Riesgo total: Es necesario tener en cuenta que el costo de falla es la suma de los costos directos (pérdida directas) más los costos indirectos (pérdidas indirectas por cierre), y por tanto el riesgo total es el cociente entre los costos directos más los indirectos y el valor de construcción de la carretera. Cuando la carretera presenta problemas de inestabilidad, las pérdidas indirectas por cierre tienen un peso importante en los costos de falla.

Curvas de vulnerabilidad por lluvia: Como ya se explicó, la vulnerabilidad es la pérdida social o económica cuando ocurre un evento que tiene el potencial de causar daño (en este caso la lluvia), usualmente expresada como un porcentaje del valor de construcción del bien. Existe dependencia directa de la vulnerabilidad con la deformación permanente e inversa con la resistencia de los materiales. Es aceptado que uno de los principales factores detonadores de fenómenos

de remoción en masa es la lluvia. Cuando existe mayor cantidad de agua en un sector dado, caracterizado por los mismos materiales geológicos, la estructura del pavimento y las obras de arte se deterioran al incrementarse la lluvia con lo que se debe invertir dinero para su recuperación. Se puede entonces relacionar la precipitación promedio mensual multi-anual acumulada desde el inicio de la estación seca con el acumulado de las pérdidas promedio valoradas también desde el inicio de la estación seca, con lo que se obtiene una curva de vulnerabilidad por lluvias.

Para asignar la lluvia representativa en cada tramo homogéneo de la vía, es necesario utilizar un método de interpolación para variables regionalizadas. Este puede ser el método de Kriging (Isaaks y Srivastava, 1989). Kriging es un método geoestadístico de estimación de puntos que utiliza un modelo de variograma para la obtención de datos. El método calcula los pesos que se darán a cada punto de referencias usado en la valoración. Esta técnica de interpolación se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. El variograma representa la tasa media de cambio de una propiedad con la distancia. El hecho de que dos observaciones próximas sean más parecidas que si estuvieran más separadas se refleja en el mismo concepto del variograma. La dependencia espacial disminuye a medida que se incrementa la distancia de las observaciones. Para la construcción del variograma, y la utilización del método de Kriging, se necesita un número representativo de datos. En caso que no se disponga de la cantidad suficiente de información, cualquier otro método de interpolación, por ejemplo los polígonos de Thiessen sería suficiente. Sabiendo de antemano que las estimaciones puntuales de la lluvia no serán muy confiables ya que a diferencia del método de Kriging, no se obtiene una medida de la variabilidad de la estimación.

Finalmente se relacionan las pérdidas que históricamente se han presentado en cada tramo por mes con la lluvia promedio mensual multi-anual que teóricamente, hace que se presente estos niveles de pérdida. La interpretación de esta gráfica hace que sea una herramienta para la gestión de carreteras, dado que se tiene 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.

## **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CASO DE LA CARRETERA BOGOTÁ - VILLAVICENCIO**

A continuación se muestran los resultados de la aplicación de la metodología al caso de la carretera Bogotá-Villavicencio.

### **Descripción general de la carretera**

Villavicencio es uno de las ciudades más importantes en Colombia, debido a su localización estratégica en el punto de unión e intercambio comercial entre los llanos orientales y la parte central de Colombia. Por esta carretera se transportan desde Bogotá muchos de los productos manufacturados con los que se abastece al oriente del país, en tanto que desde Villavicencio se transporta cantidad apreciable de productos agrícolas y agroindustriales producidos en las llanuras orientales de Colombia, necesarios para el consumo en el centro del país. La carretera está dividida en 6 tramos. El tramo 6A se refiere al antiguo tramo de la vía, relativamente paralelo al tramo 6.

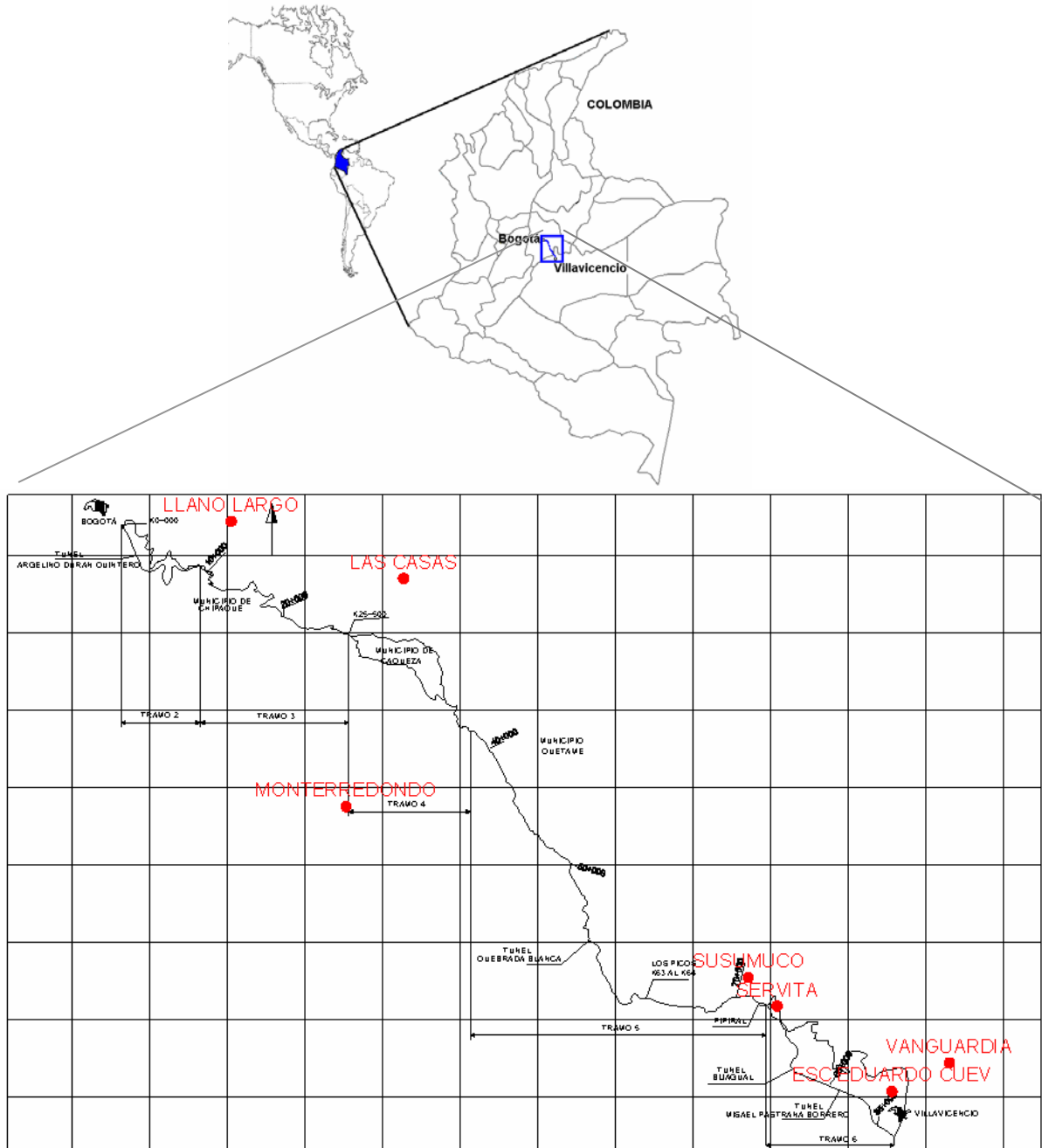
En la Tabla 1 se muestra la sectorización de la carretera Bogotá-Villavicencio y las características más importantes de cada uno de los tramos. Se menciona que los tramos comienzan en el número 2, ya que el tramo 1 forma parte de la zona urbana de Bogotá.

**Tabla 1: Sectorización de la Carretera Bogotá – Villavicencio.**

<b>ASPECTO</b>	<b>TRAMO 2</b>	<b>TRAMO 3</b>	<b>TRAMO 4</b>	<b>TRAMO 5</b>	<b>TRAMO 6</b>	<b>TRAMO 6A</b>
<b>Abscisa final</b>	K9+210	K25+510	K38+300	K70+471	K85+600	K85+600
<b>Pendiente transversal</b>	Entre el 6% - 12%	Entre el 13% - 40%	Mayores 40%	Mayores 40%	Mayores 40%	Entre el 13% - 40%
<b>Tipo de terreno</b>	Ondulado	Montañoso	Escarpado	Escarpado	Escarpado	Montañoso
<b>Pendiente longitudinal</b>	7	>8	>8	>8	7	7

ASPECTO	TRAMO 2		TRAMO 3		TRAMO 4	TRAMO 5		TRAMO 6	TRAMO 6A
Abscisa final	K9+210		K25+510		K38+300	K70+471		K85+600	K85+600
Estado superficial	Bueno		Bueno		Regular	Regular		Bueno	Regular
carriles	2	3	2	4	2	2	3	2	2
Tipo de superficie	Pavimento con mezcla asfáltica								

En la Figura 3 se muestra una planta de la carretera Bogotá-Villavicencio, y se determinan los tramos homogéneos referenciados en la Tabla 1.



**Figura 3: Localización y planta de la carretera Bogotá-Villavicencio. Con puntos, estaciones que registran la precipitación en la zona de influencia de la carretera.**

En la Tabla 2 se muestra el listado de los puentes que se encuentran a lo largo de la vía Bogotá - Villavicencio, con algunas de las características relevantes incluyendo el tramo al que pertenecen. Éste es un consolidado de la información suministrada por BILPOR (2005), INVIAS (2005) y COVIANDES (2005).

**Tabla 2: Puentes de la carretera Bogotá – Villavicencio.**

Nombre	Abscisado de inicio	Tramo	Longitud (m)	Ancho Tablero (m)	Nº Luces	Luz máxima (m)	Tipología
Vía a Une	K3+910	2	41	12.6	1	20.7	Vigas
Quente	K7+455	2	87	9.2	3	28	Curvo con Vigas
Munar	K15+170	3	30	9.25	1	30	Curvo con Vigas
Guamo	K22+990	3	30.5	11.2	1	30	Vigas en I
María Auxiliadora	K27+365	4	60.3	8.35	2	35	Vigas en I
Viaducto Caqueza	K31+250	4	390	8.4	13	28	Vigas en I
Q. La Honda	K33+960	4	20	8.4	1	20	Vigas en I
P-3	K40+230	5	51.5	9.3	3	28	Vigas en I
P – 8. Salvador	K42+000	5	63.4	9.1	4	30	Vigas en I
El Cabrestero, La Quiña	K45+916	5	16.2	10.3	1	16	Vigas rectangular
Q. Estaqueta	K46+250	5	40	11	1	40	4 Vigas, sección en I
Río Negro La Balsa	K48+245	5	75	8.6	3	29	Viga cajón
Coleo	K48+860	5	46	9.2	1	46	Vigas en I
Naranjal	K50+320	5	58.1	9.0	1	58	Vigas en I
Marcelita, p14	K50+856	5	108	9.1	2	60	viga cajón
P-16	K52+169	5	106	9.5	3	46	Vigas en I
P – 16a - La Catira	K52+413	5	62.1	9.25	2	31	Vigas en I
P17	K52+660	5	76	9.1	2	48	Vigas en I
Mastrato, P17a	K52+910	5	81	9.1	2	40	Vigas en I
Quebradablanca	K56+700	5	115	7.5	1	115	Cercha metálica
P-22 A	K58+250	5	38	9.1	3	30	Vigas en I
Perdices, Perdiz	K59+030	5	81	8.1	3	31	Vigas en I
Emiliano Restrepo	K59+535	5	115	9.1	3	53.5	Vigas en I
P 24 Guahibo	K60+510	5	70	10.55	3	30	Vigas en I
Quebrada Chirajara	K62+560	5	310	9.2	4	90	Viga metálica en cercha
P-28	K63+120	5	66	9.5	3	31	Viga rectangular
El Joropo, P29	K63+650	5	59	9.2	3	30	Viga rectangular
Caridad, P30	K63+810	5	290	9.1	4	92	Viga cajón
Aserrio	K64+440	5	146	9.1	3	72	Viga cajón
La Pala, P32	K64+870	5	155	9.1	3	72	Viga cajón
Casa de Teja	K65+070	5	170	9.15	4	66	Viga cajón
P-33, Macalito	K65+820	5	106	9.1	4	29	Vigas en I



Nombre	Abscisado de inicio	Tramo	Longitud (m)	Ancho Tablero (m)	Nº Luces	Luz máxima (m)	Tipología
Chorreron, P33a	K65+985	5	105	9.1	3	46	Vigas en I
P35	K67+650	5	90	9.1	3	33	Vigas en I
Guadales, P35a	K67+980	5	149	9.2	5	36	Vigas en I
Q. Chiguire, P35b	K68+680	5	65	9.2	1	49	Vigas en I
Susumuco	K69+090	5	130	8.0	1	82	Cercha metálica
Corrales I	K69+620	5	113.5	9.0	3	35	Vigas en I
Corrales II	K69+660	5	136	9.0	1	36	Vigas en I con Box Culvert
Caño Seco, P37	K70+471	5	176	9.0	3	88	Viga Cajón
La Colorada	K82+0270	6a	22	12	1	22,30	Losa/ Viga,3 Vigas
El Charco	K83+0270	6a	36	9.0	1	35,80	losa/ Viga,3 Vigas
Paso Desnivel Pipiral	K72+341	6	40	11	1	40	4 Vigas y Sección en I
Coloradita	K73+550	6	30	9.1	1	28	Vigas en I
Floresta	K73+992	6	71	9.1	2	41	Vigas en I
Rosario	K74+115	6	142	9.1	3	60	Vigas en I y Viga cajón
Servita	K75+345	6	173	9.1	1	110	Viga en arco
Negra	K75+920	6	65	9.1	1	60	Viga cajón
Alejandrina	K77+610	6	165	9.1	2	70	Viga cajón
Caño Maizaro	K82+735	6	65	9.2	2	42	Vigas en I y viga cajón
Caño Buque	K83+425	6	36.7	9.1	1	32	Viga cajón

En la Tabla 3 se muestra una descripción de los túneles.

**Tabla 3: Túneles de la carretera Bogotá – Villavicencio.**

Nombre	Tramo	Abscisa inicio	Abscisa final	Tipo de Revestimiento
Argelino Durán Quintero ( El Boquerón )	2	K1+069	K3+483	Concreto
Quebrada Blanca No 1	5	K55+710	K56+117	No revestido
Quebrada Blanca No 2	5	K56+189	K56+436	No revestido
Bijagual	6	K77+352	K77+576	Concreto
Misael Pastrana Borrero ( Buenavista)	6	K77+790	K82+363	Concreto

En el tramo 6 se encuentra el Viaducto Pipiral – Paso a desnivel Pipiral, ubicado desde el K72+895 a K73+440. El viaducto tiene una longitud de 545 metros. El paso a desnivel se inicia en el K72+314.

### Geología de la carretera (Celis, 2005)

La carretera Bogotá - Villavicencio atraviesa diferentes unidades geológicas, lo que hace que su comportamiento geomecánico ante la lluvia sea muy variable para cada tramo.

Tramo 2: En la salida de Bogotá, la carretera atraviesa por un terreno conformado por rocas que corresponden al terciario de la sabana de Bogotá denominadas Formación Guaduas y Formación Bogotá, que consisten en lutitas

(arcillolitas), cubiertas en varios puntos por depósitos fluvio-glaciales. En cercanías del Alto del Boquerón se encuentran areniscas con intercalaciones de lutitas, que forman parte de la Arenisca Dura de la Formación Guadalupe superior de edad Cretáceo. En el sector comprendido entre El Alto de Boquerón y la población de Chipaque, el terreno está conformado por lutitas, areniscas y calizas de la Formación Chipaque de edad Cretáceo Superior, que se extienden hasta la intersección con la vía a Une. Las rocas se encuentran cubiertas en varios sitios por depósitos de coluvión en permanente movimiento.

Tramo 3: Desde la población de Chipaque hasta el K21 aproximadamente, se encuentran las areniscas de la Formación Une de edad Cretáceo Medio. Del K21 hasta el K23 aproximadamente, el terreno está formado por lutitas, areniscas y calizas de la formación de Fómeque de edad Cretáceo Medio. Entre el K23 y el K25+500 la carretera atraviesa por un terreno conformado principalmente por areniscas con intercalaciones de lutitas de la parte superior de la Formación Alto de Cáqueza de edad Cretáceo Superior (Celis, 2005).

Tramo 4: El terreno del sector entre el K25+500 y el caserío de Puente Quetame, está conformado por rocas de la parte media de la Formación Cáqueza (lutitas con niveles de areniscas) de edad cretáceo inferior (Celis, 2005).

Tramo 5: El terreno del sector entre el Puente Téllez y el caserío de Puente Quetame, está conformado por rocas de la parte media de la formación Cáqueza (lutitas con niveles de areniscas) de edad cretáceo inferior. Desde el caserío de Puente Quetame hasta el K45 la carretera atraviesa por un terreno que está conformado por lutitas, areniscas y conglomerados de edad Cretáceo inferior. A partir del K45 hasta el K48 (puente sobre el río Negro), el terreno a lo largo del corredor de la carretera está conformado por conglomerados y areniscas de edad Cretáceo Inferior. Entre el K53 y la población de Guayabetal, la carretera atraviesa alternativamente por un terreno conformado por cuarcitas y depósito de terraza. El tramo de los túneles de Quebradablanca el terreno está conformado por cuarcitas. Desde la población de Guayabetal hasta el sitio de Pipiral, el terreno está conformado principalmente por filitas de color verde y cuarcitas de edad Cambro-Ordoviciano y en menor proporción por depósitos de terrazas (Celis, 2005). El patrón de diaclasamiento del macizo rocoso en algunos sectores de la carretera genera cuñas, presentándose en varias oportunidades caídas de roca.

Tramos 6 y 6A: En el tramo entre Pipiral y un kilómetro antes de Servitá, la carretera atraviesa por un terreno conformado por lutitas y areniscas rojas y verdes, de edad paleozoico superior. Desde el sitio anterior hasta el sitio denominado Buenavista, el terreno a lo largo del corredor está conformado por un depósito de terraza en el tramo 6 y por lutitas y niveles de areniscas del Cretáceo inferior, en el tramo 6A. Desde el sitio de Buenavista hasta llegar a Villavicencio, la carretera atraviesa por un terreno de composición litológica compleja de la Brecha de Buenavista, areniscas, conglomerados y lutitas (Celis, 2005). Los procesos de inestabilidad presentes en el sitio de Buenavista, fue uno de los aspectos que se tuvieron en cuenta para la construcción del tramo de la carretera nueva, tramo 6.

#### **COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y RIESGO DIRECTO DE LA CARRETERA BOGOTÁ - VILLAVICENCIO.**

A continuación se muestra la Tabla 4, que es un resumen de los resultados obtenidos para los costos de construcción de los puentes, túneles y de la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto (columna 5), junto con la pérdida directa promedio anual de cada tipo de infraestructura de la carretera Bogotá-Villavicencio (columna 4). En la columna 5 de la misma tabla se muestra el cálculo del riesgo por pérdidas directas, o riesgo directo. En este punto es importante mencionar que para obtener la pérdida promedio anual es necesario tener la pérdida promedio mensual, la cual a su vez servirá como insumo de las curvas de vulnerabilidad por lluvia.

**Tabla 4: Riesgo por pérdidas directas e indirectas para la carretera Bogotá-Villavicencio.**

TRAMO	Puente, túnel, viaducto o carretera construida en material térreo a cielo abierto (MTCA)	Total pérdidas directas*	Pérdida promedio anual directa *	Costo de construcción*	Riesgo directo en tanto por mil (‰)	Riesgo directo e indirecto (riesgo total) en tanto por mil (‰)
TRAMO 2	TUNEL ARGELINO DURÁN - EL BOQUERON	395,985.4	98,996.4	71,964,050.0	1.38	1.38
	VIA A UNE - PASO ELEVADO	6,750.7	1,687.7	836,247.2	2.02	2.02
	QUENTE	14,324.6	3,581.2	2,629,335.4	1.36	1.36

TRAMO	Puente, túnel, viaducto o carretera construida en material térreo a cielo abierto (MTCA)	Total pérdidas directas*	Pérdida promedio anual directa *	Costo de construcción*	Riesgo directo en tanto por mil (‰)	Riesgo directo e indirecto (riesgo total) en tanto por mil (‰)
	MTCA T-2	1,292,869.0	323,217.3	7,658,988.6	42.20	42.20
	<b>TOTAL TRAMO 2</b>		<b>427,482.4</b>	<b>83,088,621.3</b>	<b>5.14</b>	<b>5.14</b>
TRAMO 3	MUNAR	55,303.3	13,825.8	906,667.4	15.25	15.25
	GUAMO	5,021.9	1,255.5	632,284.5	1.99	1.99
	MTCA T-3	744,249.7	186,062.4	16,902,291.8	11.01	11.01
	<b>TOTAL TRAMO 3</b>		<b>201,143.7</b>	<b>18,441,243.7</b>	<b>10.91</b>	<b>10.91</b>
TRAMO 4	MARIA AUXILIADORA	8,102.3	2,025.6	1,451,127.9	1.40	1.40
	VIADUCTO - PUENTE CÁQUEZA	52,402.7	13,100.7	9,147,051.9	1.43	1.43
	QUEBRADA LA HONDA	44,990.0	11,247.5	481,302.8	23.37	23.37
	MTCA T-4	783,214.6	195,803.7	12,479,684.7	15.69	15.69
	<b>TOTAL TRAMO 4</b>		<b>222,177.4</b>	<b>23,559,167.4</b>	<b>9.43</b>	<b>9.43</b>
TRAMO 5	P-3	31,161.6	7,790.4	728,004.0	10.70	10.70
	P-8 SALVADOR CAMACHO ROLDAN	9,086.7	2,271.7	884,271.9	2.57	2.57
	EL CABRESTERO, LA QUIÑA	31,597.2	7,899.3	201,411.2	39.22	222
	QUEBRADA ESTAQUECA	27,229.0	6,807.2	520,415.0	13.08	249.01
	RIO NEGRO, LA Balsa	35,656.4	8,914.1	1,434,261.7	6.22	6.22
	PN 10 - COLEO	46,215.0	11,553.7	445,370.5	25.94	25.94
	NARANJAL	8,327.1	2,081.8	771,733.2	2.70	2.70
	P 14- MARCELITA	15,479.0	3,869.7	1,620,025.9	2.39	2.39
	P-16	68,748.9	17,187.2	1,490,065.1	11.53	11.53
	P 16A LA CATIRA	37,575.5	9,393.9	755,759.4	12.43	12.43
	P17 GUADALUPE SALCEDO	45,986.1	11,496.5	1,030,195.2	11.16	11.16
	P 17A - MONTERREDONDO, MASTRATO	49,011.5	12,252.9	953,431.2	12.85	12.85
	PUENTE QUEBRADABLANCA	53,947.4	13,486.9	1,634,577.7	8.25	8.25
	TUNEL QUEBRADA BLANCA 1	7,115,556.4	1,778,889.1	4,176,666.7	425.91	533.28
	TUNEL QUEBRADA BLANCA 2	4,696,705.1	1,174,176.3	4,177,266.1	281.09	388.44
	P-22A	5,446.3	1,361.6	433,408.9	3.14	3.14
	PERDICES - LA PERDIZ	11,609.2	2,902.3	662,288.0	4.38	4.38
	P 23- EMILIANO RESTREPO ECHAVARRIA	16,482.2	4,120.6	1,149,004.8	3.59	3.59

TRAMO	Puente, túnel, viaducto o carretera construida en material térreo a cielo abierto (MTCA)	Total pérdidas directas*	Pérdida promedio anual directa *	Costo de construcción*	Riesgo directo en tanto por mil (‰)	Riesgo directo e indirecto (riesgo total) en tanto por mil (‰)
	P 24 - GUAHIBO	48,559.4	12,139.9	782,479.1	15.51	15.51
	Q CHIRAJARA	106,400.4	26,600.1	9,734,001.6	2.73	2.73
	P-28	39,935.3	9,983.8	1,088,219.2	9.17	9.17
	P 29 - EL JOROPO	35,699.7	8,924.9	562,741.3	15.86	15.86
	P 30 CARIDAD	41,563.9	10,391.0	4,051,034.9	2.57	2.57
	ASERRIO	24,375.7	6,093.9	2,295,480.2	2.65	2.65
	P 32 LA PALA	22,215.2	5,553.8	2,413,772.2	2.30	2.30
	CASA DE TEJA	28,065.5	7,016.4	1,481,122.3	4.74	4.74
	P 33 MACALITO	43,480.0	10,870.0	1,566,067.7	6.94	6.94
	P 33A CHORRERON	63,533.4	15,883.3	1,721,116.0	9.23	9.23
	P 35	71,082.7	17,770.7	1,058,565.8	16.79	16.79
	P 35A - GUADUALES	445,074.0	111,268.5	2,705,379.4	41.13	41.13
	P 35B QUEBRADA CHIGUIRE	9,316.0	2,329.0	770,251.5	3.02	3.02
	SUSUMUCO	18,632.1	4,658.0	1,847,783.5	2.52	2.52
	CORRALES I	18,931.3	4,732.8	1,301,064.0	3.64	3.64
	CORRALES II	22,684.2	5,671.1	1,558,984.2	3.64	3.64
	P 37 CAÑO SECO	25,620.1	6,405.0	2,909,532.3	2.20	2.20
	MTCA T-5	1,937,146.0	484,286.5	41,848,688.0	11.57	89.26
	<b>TOTAL TRAMO 5</b>		<b>3,827,033.8</b>	<b>102,764,439.7</b>	<b>37.24</b>	<b>83.08</b>
TRAMO 6	VIADUCTO PIPIRAL	19,993.6	4,998.4	15,936,205.2	0.31	0.31
	COLORADITA	1,343.7	335.9	159,978.5	2.10	2.10
	FLORESTA	3,180.0	795.0	701,474.3	1.13	1.13
	ROSARIO	6,360.0	1,590.0	891,737.2	1.78	1.78
	SERVITA	7,748.4	1,937.1	2,081,219.7	0.93	0.93
	NEGRA	2,911.3	727.8	312,580.9	2.33	2.33
	TUNEL BIJAGUAL	30,537.3	7,634.3	4,819,801.4	1.58	1.58
	Q. ALEJANDRINA	841,240.7	210,310.2	2,142,502.7	98.16	98.16
	TUNEL MISAEL PASTRANA BORRERO	662,832.9	165,708.2	115,857,605.2	1.43	1.43
	CAÑO MAIZARO	12,210.5	3,052.6	470,119.1	6.49	6.49
	CAÑO BUQUE	6,894.2	1,723.6	476,544.5	3.62	3.62
	MTCA T-6	722,903.2	180,725.8	13,834,614.8	13.06	13.06
	<b>TOTAL TRAMO 6</b>		<b>579,539.0</b>	<b>157,684,383.5</b>	<b>3.68</b>	<b>3.68</b>
TRAMO 6A	LA COLORADA	15,342.6	3,835.6	255,567.5	15.01	15.01
	EL CHARCO	8,286.7	2,071.7	412,575.3	5.02	5.02
	PASO A DESNIVEL	8,286.7	2,071.7	317,893.2	6.52	6.52

TRAMO	Puente, túnel, viaducto o carretera construida en material térreo a cielo abierto (MTCA)	Total pérdidas directas*	Pérdida promedio anual directa *	Costo de construcción*	Riesgo directo en tanto por mil (‰)	Riesgo directo e indirecto (riesgo total) en tanto por mil (‰)
	PIPIRAL					
	MTCA T-6A	2,106,569.2	526,642.3	12,907,130.7	40.80	40.80
	TOTAL TRAMO 6A		534,621.3	13,893,166.7	38.48	38.48

\* A precios de 2004, en dólares americanos.

Para calcular el riesgo por pérdidas directas de la carretera Bogotá - Villavicencio es necesario sumar las pérdidas promedio anuales para todos los puentes, viaductos, túneles y CCMTCA y dividir este resultado entre la suma del valor de construcción nuevo de toda la carretera. Al tener en cuenta el tramo 6A (alternativo al tramo 6 - vía antigua) se obtiene que el riesgo directo de la carretera es 0.0145 o 14.5 ‰ y sin tener en cuenta el tramo correspondiente a la carretera antigua desde Pipiral a Villavicencio se obtiene un valor de 13.6 ‰.

### **RIESGO TOTAL (POR PÉRDIDAS DIRECTAS E INDIRECTAS) DE LA CARRETERA BOGOTÁ - VILLAVICENCIO.**

Una vez realizada la recopilación de la información referente a cierres totales de la vía, se obtiene que el único tramo que contribuye a las pérdidas indirectas es el número 5, por lo que el riesgo total para el tramo 5 aumenta de 37.24 ‰ a 83.03 ‰. Lo anterior debido a los cierres de vía que se presentan en tres puntos claramente definidos: El primero es el sitio conocido como Los Picos entre el K63 y K64, donde se presenta caídas de bloques de gran tamaño principalmente en época invernal. El segundo sitio es donde está ubicado el puente El Cabrestero sobre la Quebrada La Quiña (K45+690), donde se han presentado avalanchas de material que han interrumpido durante varios días el tráfico, principalmente durante el año 2004. En el tercer sitio se localizan los Túneles de Quebradablanca 1 y 2 (entre el K55+710 y el K56+436). Estos túneles fueron construidos durante la década de los setentas sin revestimiento. Lo anterior ha incidido en que hayan sido necesarias obras para el manejo de agua que se infiltran en las paredes y en la solera. La continua infiltración del agua del macizo rocoso hacia el túnel ha deteriorado la estructura del pavimento. Los costos de reparación en estos puntos se ven reflejados en el aumento de la vulnerabilidad económica directa e indirecta del tramo 5. El tiempo medio de cierre de la vía es de 7.01 días por año. Por tanto la tasa anual de interrupción es del orden del 19 ‰. La mayor cantidad de cierres en la vía se producen por eventos sucedidos en la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto en el tramo 5. Lo anterior se debe a cierres programados con anterioridad para hacer descarga controlada de taludes en el sector Los Picos, en donde se presentan repetidamente caídas de bloques del material rocoso. Sigue en orden de importancia, los cierres que se presentan por eventos en puentes, viaductos y túneles, específicamente en el Tramo 5, en los túneles Quebrada Blanca 1 y 2, Quebrada La Quiña y Quebrada Estaquecas.

Integrando las pérdidas indirectas con las pérdidas directas promedio anuales, se obtiene un riesgo total (pérdidas directa e indirectas) de la carretera Bogotá - Villavicencio incluyendo el tramo 6A de 0.0263 o 26.3 ‰ y sin tener en cuenta el tramo correspondiente a la carretera antigua desde Pipiral a Villavicencio se obtiene un valor de 25.9 ‰.

En este punto es importante mencionar como parámetro de comparación, valores de promedio internacional de riesgo para carreteras aproximadas del 1% o 10 ‰ (Munich Re, 1990).

### **CURVAS DE VULNERABILIDAD POR LLUVIA PARA LA CARRETERA BOGOTÁ - VILLAVICENCIO**

Una curva de vulnerabilidad por lluvia para una carretera relaciona las pérdidas promedio mensual directa e indirecta con las lluvias que generan dichas pérdidas. Es necesario entonces realizar un análisis estadístico de la precipitación a lo largo del alineamiento de la carretera.

#### **Precipitación a lo largo del alineamiento de la carretera**

Es aceptado que debido a los fenómenos de remoción en masa es necesario realizar algún tipo de inversión para estabilizar dichos movimientos, es decir, el dinero que se dispone para mitigar el deslizamiento es la pérdida debida a este evento. Una vez se presentan las temporadas de lluvia, el factor de seguridad de las laderas se reduce debido a la infiltración del agua dentro del cuerpo del talud, generándose gradientes de energía por flujo. En dicha situación, generalmente las fuerzas desestabilizadoras aumentan y las fuerzas estabilizadoras disminuyen por lo que se ve reflejado

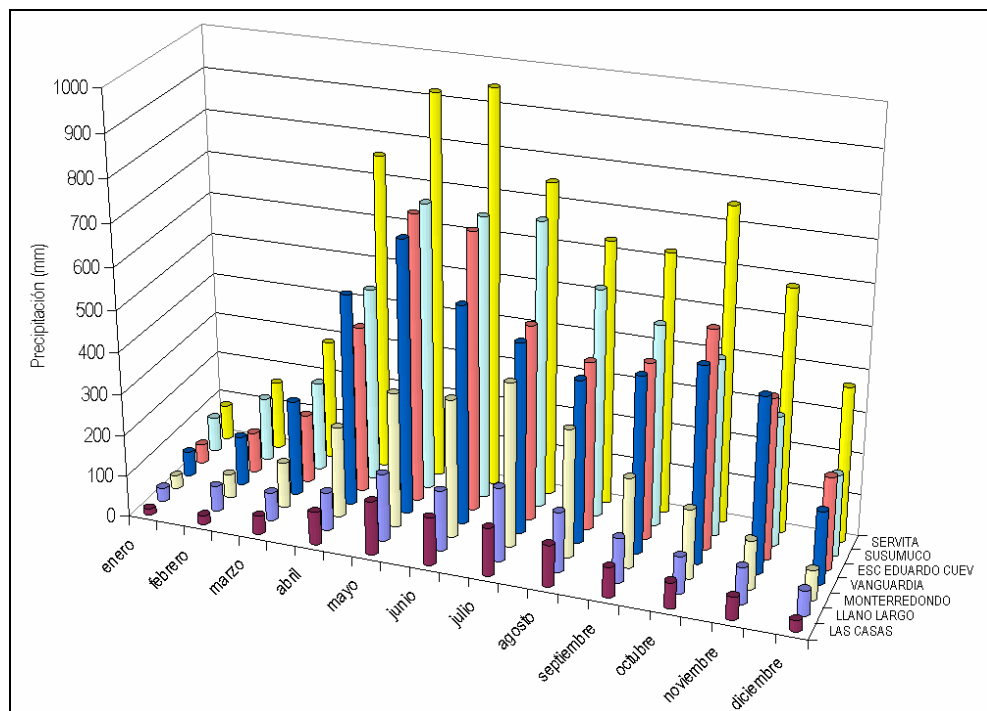
en un menor factor de seguridad que puede llevar el talud a la falla. Dado lo anterior, es evidente que debe existir una relación entre los dineros que se dispongan para solucionar los inconvenientes presentados anteriormente y el régimen de precipitación en la zona de estudio.

### Estaciones pluviométricas

Para establecer relaciones entre las lluvias y las pérdidas económicas directas en la carretera es prioritario obtener información pluviométrica representativa del alineamiento de la carretera. Las estaciones ubicadas en la zona de influencia de la carretera Bogotá-Villavicencio se presentan en la Tabla 5 y en la Figura 3, junto con la distancia más cercana al eje de la carretera. De estas estaciones se obtuvo información de precipitación total mensual en milímetros.

**Tabla 5: Estaciones pluviométricas ubicadas en la zona aferente de la carretera Bogotá - Villavicencio.**

Coordenadas	Elevación (m s/n.m.)	E	N	Distancia aproximada al eje de la vía (m)	Nombre
0429N 7402W	1000	987204.244	1005281.06	3585	Llano Largo
0427N 7356W	2100	983519.635	1016380.37	4042	Las Casas
0419N 7358W	1300	968774.684	1012682.92	8957	Monterredondo
0413N 7344W	1000	957724.174	1038590.52	1228	Susumuco
0412N 7343W	1500	955881.957	1040441.82	610	Servita
0409N 7339W	550	950356.494	1047846.82	1790	Esc Eduardo Cuev
0410N 7337W	423	952201.669	1051546.98	5961	Vanguardia



**Figura 4: Precipitación promedio mensual multi-anual en las estaciones aferentes a la carretera.**

En la Figura 4 se muestra la precipitación promedio mensual multi-anual para cada una de las estaciones. Se observa que en las cercanías de Bogotá la precipitación es baja (estación de Llano Largo y Las Casas). A medida que disminuye la altitud, la precipitación aumenta. En los alrededores de Villavicencio, (costado oriental de la cordillera oriental), donde se encuentran ubicadas las estaciones de Susumuco y Servitá, la lluvia se incrementa. El régimen de precipitación

parece ser bimodal en las estaciones cercanas de Villavicencio, donde las temporadas lluviosas se concentran en los meses de marzo–abril–mayo y agosto–septiembre. La temporada de menor precipitación se presenta en los meses de diciembre enero y febrero, mostrando casi siempre la menor precipitación el mes de enero.

### Asignación de precipitación por tramos de la carretera

Para correlacionar la información obtenida de las pérdidas en cada tramo de la carretera con las lluvias en la zona de estudio, es necesario utilizar algún método de interpolación que permita estimar el valor de lluvia en los sitios en donde no se tiene una estación. Con ayuda del método de interpolación de Kriging es posible realizar estimaciones de variables regionalizadas en una zona en donde no se tiene cubrimiento total de dichas variables (Isaaks y Srivastava, 1989), con base en la utilización de un variograma teórico generado por un variograma experimental originado por los datos reales de las estaciones.

El procedimiento de asignación fue el siguiente: La información que se utilizó para calcular la vulnerabilidad y el riesgo de la carretera es la comprendida entre el año de 2000 al 2003, dado que desde el año 2000 el alineamiento de la carretera es el actual y fue al que se le calculó el costo de construcción o valor nuevo de reposición. Por lo anterior se procedió a establecer cuales fueron las lluvias que generaron estas pérdidas por tramo. Como se tiene información de cada una de las estaciones a lo largo del alineamiento de la carretera para cada uno de los 12 meses durante los años de 2000 al 2003, fue necesario realizar el procedimiento de geoestadística 48 veces. De esta forma se tienen isoyetas para cada mes para cada año. En la Figura 5 se muestra como ejemplo los resultados de la aplicación de la geoestadística para la precipitación del mes de agosto de 2000. Una vez obtenida las isoyetas, se procedió a realizar la asignación de la precipitación por medio de promedios ponderados con relación a la longitud entre isoyetas consecutivas para cada tramo. En la Tabla 6 se presenta el promedio mensual multi-anual de la precipitación acumulada en milímetros para cada tramo. Este último es el que servirá para relacionarlo con las pérdidas directas e indirectas que se han generado en la carretera.

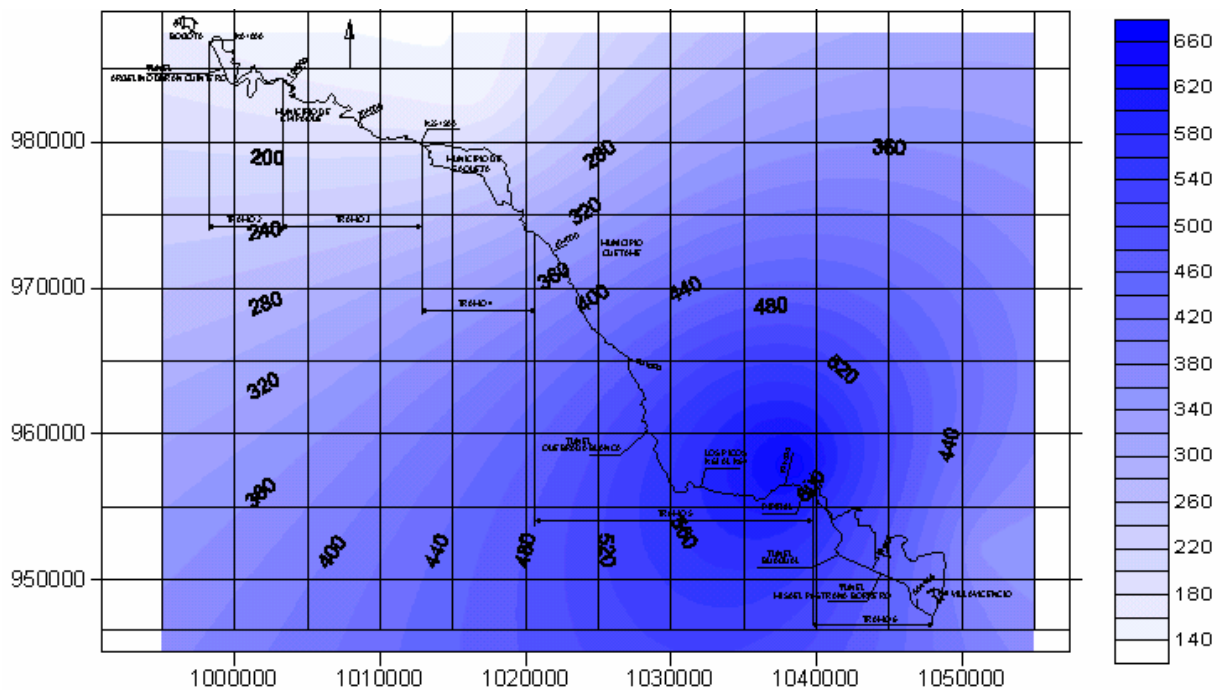


Figura 5: Isoyetas generadas a través de la geoestadística en la carretera para agosto de 2000.

Tabla 6: Precipitación promedio mensual multi-anual acumulada para cada tramo en milímetros.

	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6
Enero	17.2	13.3	10.4	27.6	30.4
Febrero	75.1	57.0	35.3	80.6	103.0

	<b>TRAMO 2</b>	<b>TRAMO 3</b>	<b>TRAMO 4</b>	<b>TRAMO 5</b>	<b>TRAMO 6</b>
Marzo	135.8	128.5	134.8	270.2	309.0
Abril	236.6	234.6	281.7	624.1	882.7
Mayo	428.6	430.8	553.1	1255.8	1745.8
Junio	583.6	591.3	785.8	1814.3	2493.6
Julio	741.6	754.7	997.8	2292.2	3051.9
Agosto	920.1	926.1	1214.2	2800.2	3547.9
Septiembre	1057.8	1055.6	1379.0	3222.9	4055.5
Octubre	1157.1	1157.4	1516.4	3590.4	4626.3
Noviembre	1232.3	1229.9	1618.5	3877.4	5114.8
Diciembre	1296.6	1287.8	1692.0	4082.1	5443.4

### **Curvas de vulnerabilidad económica por lluvia de la carretera Bogotá - Villavicencio**

A partir de los resultados de las pérdidas promedio mensual multi-anual acumulada de cada tramo de la carretera dividido entre el valor de reposición a nuevo y con la información de la precipitación promedio mensual multi-anual acumulada, es posible obtener curvas de vulnerabilidad por lluvia para cada uno de los tramos de la carretera Bogotá Villavicencio. De cada contrato de inversión en la carretera se tiene el tiempo de ejecución, por lo que es posible calcular el promedio mensual multi-anual de dichas inversiones por tramo. Este dinero dividido entre el costo de construcción se relaciona uno a uno con la precipitación promedio mensual multi-anual en cada tramo de la carretera para el mismo mes. En resumen, se tiene para cada tramo y mes, una pérdida promedio mensual acumulada con relación al costo de reposición a nuevo (costo de construcción) y una lluvia también acumulada anual desde el inicio de la estación seca. El gráfico que relaciona estas dos variables representa una curva de vulnerabilidad. Los puntos que se obtuvieron de los datos reales se ajustaron a un modelo polinómico.

El anterior ejercicio se puede realizar tanto para las pérdidas directas como para las pérdidas totales (directas e indirectas).

En la Figura 6 se muestran los puntos para el cálculo de la vulnerabilidad económica por pérdidas directas, o vulnerabilidad directa por lluvia, junto con los modelos a los que se ajustaron dichos puntos para cada tramo.

En la Figura 7 se muestra para cada tramo los puntos para el cálculo de la vulnerabilidad económica directa e indirecta, es decir, también se toma en cuenta las pérdidas consecuenciales para el cálculo de la vulnerabilidad. Es importante mencionar que el tramo donde se presentan los cierres totales (tramo 5) no tiene vías alternas con tiempos de viaje cortos. En este caso, los productos perecederos que no son transportados en el tiempo estipulado y por tanto van a disminuir su valor comercial, hasta el punto extremo en que pierden totalmente su posibilidad de venta.

## **DISCUSIÓN**

### **Costos de construcción**

Los costos promedio de construcción para la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto oscilan alrededor de 1.2 millones de dólares (de 2004) por kilómetro. El valor promedio presenta variabilidad a lo largo del eje vial, i.e. un coeficiente de variación de 0.20, debido a que los diversos tramos poseen características geométricas y geológicas muy diversas. Por ejemplo, el tramo 6 tiene el valor unitario más costoso, i.e. 1.46 millones de dólares (de 2004) por kilómetro, mientras que el tramo 6A, con apenas 2 carriles en toda su longitud, tiene un valor de construcción unitario de 0.89 millones de dólares (de 2004) por kilómetro.



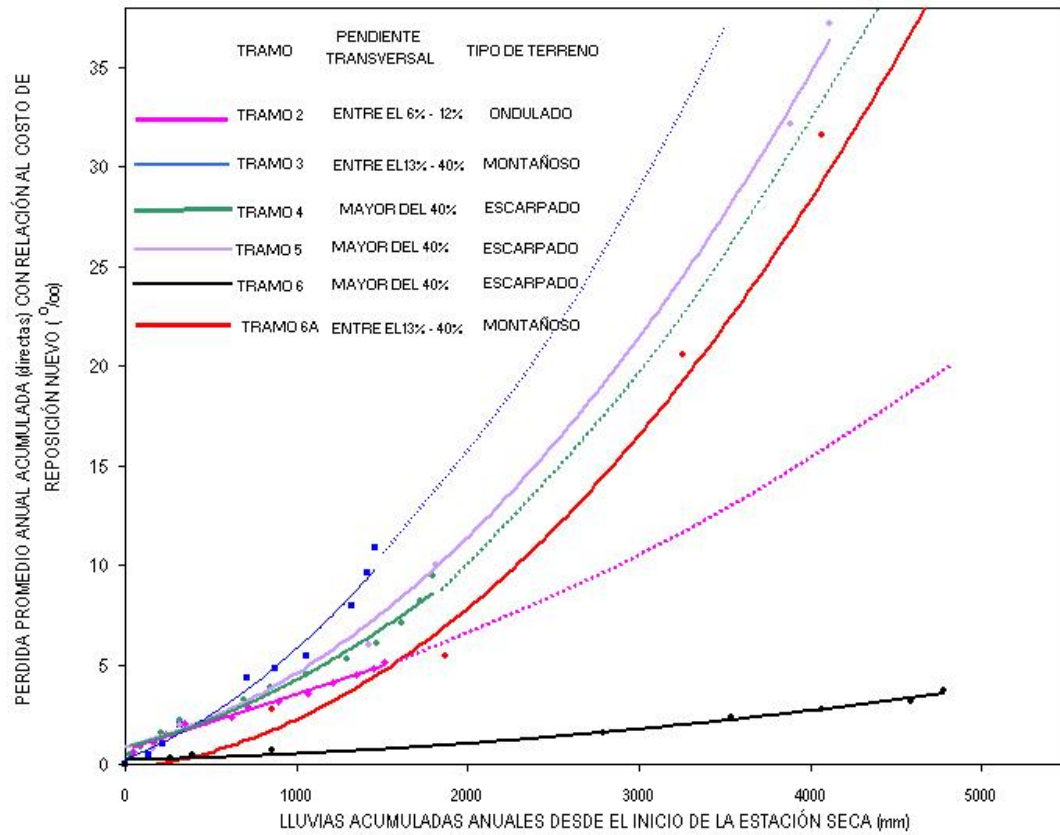


Figura 6: Curvas de vulnerabilidad directa por lluvia para la totalidad de la carretera Bogotá - Villavicencio.

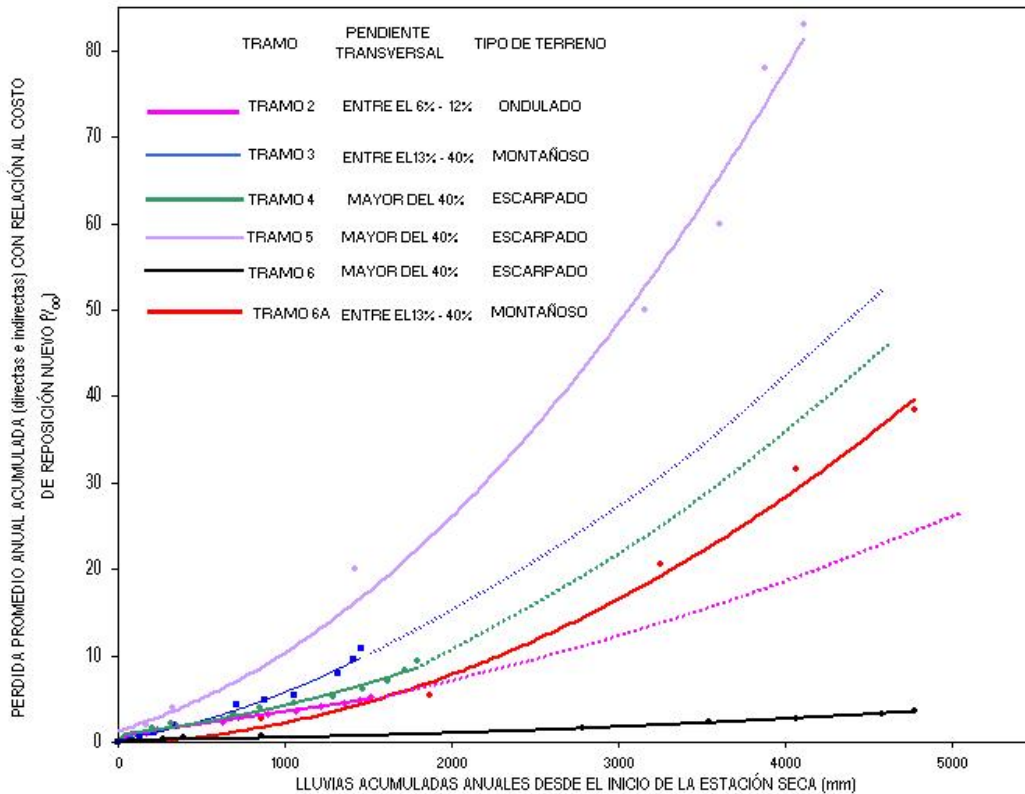


Figura 7: Curvas de vulnerabilidad directa e indirecta por lluvia para la totalidad de la carretera Bogotá – Villavicencio.

El costo promedio de construcción de túneles en la carretera Bogotá - Villavicencio es de 22.5 millones de dólares (de 2004) por kilómetro con un coeficiente de variación de 0.31 a lo largo del alineamiento de la carretera. El costo promedio de construcción de puentes en la carretera Bogotá - Villavicencio es de 14.13 millones de dólares (de 2004) por kilómetro con un coeficiente de variación de 0.41. El alto nivel de variación en el costo de los puentes puede estar ligado con la amplia diversidad en los métodos constructivos y tipos. En cuanto a la mayor variabilidad de los costos de túneles cuando se comparan con aquellos de la carretera con materiales a cielo abierto consideramos que posiblemente esta se deba a la dificultad de prever las condiciones geológicas para la perforación de túneles.

El costo de construcción de la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto es de 106 millones de dólares (de 2004), en tanto que los puentes, túneles y viaductos han tenido un costo de construcción de 293.6 millones de dólares a precios constantes de 2004. El costo de construcción de la infraestructura en puentes, túneles y viaductos es casi 3 veces mayor que el costo de la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto.

El costo de construcción total de la carretera Bogotá - Villavicencio es de casi 400 millones de dólares - (Precios constantes de 2004).

### **Pérdidas directas y riesgo directo**

Las pérdidas directas promedio anuales para la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto están alrededor de 1.9 millones de dólares, para un valor unitario por kilómetro de 21,576 dólares (de 2004).

La carretera construida en materiales térreos a cielo abierto del tramo 2 presenta las mayores pérdidas unitarias con 40,500 US-dólares/km. Pérdidas elevadas presenta también el tramo 6A con 36,300 US-dólares/km. Las menores pérdidas directas unitarias se presentan en el tramo 3 de la carretera con 12,000 US-dólares/km.

Durante el desarrollo del presente trabajo se realizaron varios recorridos por la vía, donde se pudo constatar que el Tramo 2, que presenta las mayores pérdidas unitarias, atraviesa una zona caracterizada por coluviones que en la actualidad están en proceso de reptamiento. A lo largo del tramo 2 se observa que en sitios específicos la superficie de rodadura está constituida por adoquines. Lo anterior para permitir la deformación permanente. Una vez se ha presentado un movimiento significativo, se procede a renivelarla y a disponer de nuevo el adoquín. El tipo de geología donde predominan coluviones ayuda a explicar el alto valor de las pérdidas directas. Por otro lado, en el tramo 6A se encuentra el sitio denominado "El Mirador" que ha presentado repetidos problemas de inestabilidad durante mucho tiempo.

Las pérdidas directas promedio *anuales* para los puentes, viaductos y túneles de la carretera Bogotá Villavicencio alcanzan los 3.9 millones US\$ dólares. Esto es el doble de las pérdidas directas promedio anuales en la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto.

Los puentes, viaductos y túneles del tramo 5 presenta las mayores pérdidas unitarias con 399,000 US-dólares/km, el tramo 3 tiene 250,000 US-dólares/km. Las menores pérdidas directas unitarias se presentan en los puentes, viaductos y túneles del tramo 2 con 41,000 US-dólares/km.

El riesgo por pérdidas directas de los puentes, túneles y viaductos de la carretera Bogotá - Villavicencio tiene una variabilidad muy alta. Hay puentes que tienen un riesgo tan bajo como del 1 ‰, por ejemplo el puente Servitá del tramo 6, así como existe otro tipo de infraestructura que tiene un riesgo muy alto, por ejemplo el Túnel de Quebrada Blanca 1 que es del orden del 425 ‰, perteneciente al tramo 5 de la carretera. Este altísimo valor de riesgo es debido a las inversiones que se le han realizado en los últimos 4 años para actualizar su funcionamiento ya que no se encuentra recubierto.

Existe un comportamiento general de aumento en el riesgo por pérdidas directas en los puentes, viaductos y túneles a medida que se incrementan las pendientes transversales de la carretera y a medida que el tipo de terreno pasa de ondulado a montañosos y escarpado. Este comportamiento se observa desde el tramo 2 hasta el tramo 5. El tramo 6, a pesar que tiene pendientes transversales mayores del 40% y tipo de terreno escarpado, sus puentes y túneles tiene un valor moderado de riesgo.

Se observa que el riesgo por pérdidas directas de la carretera incluyendo materiales térreos a cielo abierto y puentes túneles y viaductos alcanza un valor de 14.5 ‰ incluyendo el Tramo 6A. Si no se tiene en cuenta el Tramo 6A se obtiene un riesgo de 13.6 ‰. Los valores internacionales de vulnerabilidad dados por las tasas anuales de seguro para cubrir carreteras raramente exceden el 10‰ (Munich Re, 1990). De la Tabla 4 se observa que para los tramos 2, 3, 4 y 6

de la carretera se obtiene riesgo del mismo orden de magnitud o menores que los máximos valores de riesgo establecidos por estándares internacionales. Los tramos 5 y 6A tiene estimaciones del riesgo que son 3 veces mayores que el 10‰. El alto riesgo en el tramo 5 es debida a los puentes que están emplazados en el alineamiento, en tanto que para el Tramo 6A, el alto riesgo está asociada con la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto. Este factor de casi cuatro entre los promedios internacionales y los tramos 5 y 6A, refleja las características geológico-geotécnicas especialmente difíciles propias de la vía, así como prácticas locales en el diseño, construcción y contratación. De esta forma, los tramos 5 y 6A *no serían asegurables*, sin embargo es importante anotar que es posible construir y operar carreteras en Colombia con valores de riesgo máximo, i.e. 10‰.

Al comparar el riesgo directo de la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto del tramo 6 (13.1 ‰) con el tramo 6A (40.8 ‰), se observan diferencias sustanciales para niveles de lluvias similares. Es importante mencionar que el tramo 6A es el tramo antiguo de la carretera, donde fenómenos de remoción en masas se presentan repetidamente. Por lo anterior, se cambió el alineamiento de la carretera con la construcción del tramo 6. El tramo 6A actualmente se utiliza como paso alterno para vehículos de gran tonelaje, con el fin de evitar el paso por los túneles de Bijagual y Misael Pastrana Borrero. El alto valor de riesgo del tramo 6A con respecto al tramo 6 muestra de cierta forma las características geotécnicas de cada tramo, por lo que los costos para mitigar las inestabilidades del terreno se reflejan en las diferencias del riesgo estimado. Por otro lado, el tramo 2 tiene riesgo por pérdidas directas del 42.2 ‰, valor similar al del tramo 6A, sin embargo los niveles máximos de lluvias anuales acumulada son muy distintos (1297mm – 5443mm) respectivamente. Este comportamiento puede explicarse debido a que el tramo 2 atraviesa grandes masas de coluviones que aún están en movimiento, por lo que se ha tenido que disponer dinero en la carretera en altas proporciones para que la carretera tenga un nivel mínimo de servicio. Aunque en el tramo 2 se presenten niveles de lluvia bajos comparados con los del tramo 6A, el riesgo por pérdidas directas es similar.

En el tramo 5 se encuentran ubicados los túneles de Quebradablanca 1 y 2. Dichos túneles no tienen ningún tipo de recubrimiento. De aquí que la influencia del agua en el deterioro del pavimento en estos túneles es muy relevante. Importantes cantidades de dinero se han invertido en mantenimiento para manejar la infiltración del agua en la solera. Estos dineros se ven reflejados claramente en el alto valor del riesgo por pérdidas directas en el tramo 5 para puentes, túneles y viaductos, en comparación para los demás tramos.

En términos generales se observa que los puentes, túneles (con excepción de los de Quebrada Blanca) y viaductos tienen menores valores de riesgo, es decir registran menores pérdidas directas, a pesar que los costos de construcción son mayores.

### **Pérdidas indirectas y riesgo indirecto**

La estimación de las pérdidas por cierre (indirectas) de la carretera se realizó con base en los costos que eran claramente identificables y con posibilidad de estimarlos. Es decir, el de los productos perecederos transportados por la carretera, el costo de paralización de la mano de obra de las personas retenidas en la carretera y el costo de los peajes no recibidos por el cierre de la misma. Otros costos como los relacionados con la interrupción del turismo, la disminución en los negocios y actividades por demora en la llegada de personas y productos no son fácilmente evaluables. Por tanto, las pérdidas que se presentan son inferiores a las que realmente ocurren en la carretera, así que se deben considerar como mínimas.

Los cierres totales se presentan en dos sitios puntuales, en el Sector Los Picos y en los túneles de Quebradablanca. (entre el K55 y 56). Por lo que es posible decir que los cierres en esta carretera son función principalmente de las condiciones geológicas propias del sector.

Se observa que la totalidad de pérdidas indirectas en la carretera Bogotá - Villavicencio se establecen en el Tramo 5, tanto en la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto, como en los puentes, viaductos y túneles. Esta situación se genera, por un lado, porque en el tramo 5 se presentan procesos de remoción en masa tales como caídas de rocas, por lo que es necesario realizar descarga controlada de los taludes para evitar incidentes con los vehículos que transitan por la carretera y por otro lado, al manejo de emergencias que se han tenido que realizar en el sector de los túneles de Quebradablanca 1 y 2, la quebrada La Estaqueca y la quebrada La Quiña.

Al comparar las pérdidas promedio anuales directas de la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto del tramo 5 con las del tramo 2, se observa que en esta última, las pérdidas directas son mayores que las del tramo 5. Sin embargo, no se presentan cierres de la carretera en el tramo 2. Es decir, el riesgo por pérdidas directas no está proporcionalmente relacionado con el riesgo por pérdidas indirectas. Lo anterior se puede explicar debido a que los

procesos de inestabilidad en el tramo 2 se manifiestan de forma lenta. Es decir, la velocidad del movimiento de los procesos de inestabilidad en el tramo 2 (coluviones) es más lenta en comparación con la velocidad del movimiento de la inestabilidad del tramo 5, por lo que el Tramo 2 deja tiempo de respuesta para disminuir los efectos negativos del movimiento.

Por otro lado, es posible que los costos para manejar procesos tan complejos, como es el movimiento de coluviones, son mayores a los que se tiene que incurrir en la mitigación de caídas de bloques. Los movimientos de grandes coluviones se presentan en el tramo 2, en tanto que las caídas de bloque se presentan típicamente en el tramo 5. Sin embargo, las obras para mitigar los procesos de remoción del tramo 2 pueden llevarse a cabo, con cierres parciales o sin cierre de la carretera, por lo que las pérdidas indirectas en la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto en este tramo son menores que en el tramo 5. En el tramo 5 las manifestaciones del movimiento del macizo rocoso pueden variar en corto tiempo, en tanto que en el tramo 2 las manifestaciones suelen ser de carácter progresivo lento, lo que repercute directamente en las pérdidas indirectas.

Consideramos entonces que las pérdidas y por tanto la vulnerabilidad de materiales geológicos se encuentra asociado directamente no sólo con el grado de deformabilidad sino también con el nivel de *fragilidad* de los mismos. Los materiales más frágiles causarán pérdidas indirectas más elevadas.

### **Curvas de vulnerabilidad económica por lluvia**

La Figura 6 muestran las curvas de vulnerabilidad económica directa y la Figura 7 presenta las curvas de vulnerabilidad directa e indirecta por lluvia para la infraestructura vial que comunica Bogotá con Villavicencio. El máximo valor de vulnerabilidad económica para cada tramo está dado por la Tabla 4, la cual coincide con la pérdida acumulada anual promedio y por tanto es el mismo riesgo. A partir de ese punto de riesgo calculado, se realiza una extrapolación del comportamiento de la vulnerabilidad. Dicha extrapolación se muestra como línea punteada. La parte punteada de la curva será aplicable en carreteras que tengan unas características geométricas y geológicas parecidas a la de Bogotá – Villavicencio, sin embargo con niveles de lluvia mayores a los que se presentan en esta zona. Esta zona de extrapolación debe ser verificada con datos reales de otras carreteras con niveles de lluvia superiores a los indicados para cada tramo de la carretera Bogotá - Villavicencio.

De la Figura 6 se observa que la vulnerabilidad económica directa asociada a la lluvia aumenta en la medida en que se desciende hacia Villavicencio. Esto ocurre para todos los tramos, con excepción del tramo 6 que presenta una vulnerabilidad baja. Los tramos 2, 3 y 4 tiene riesgo por pérdidas directas bajas, de menos del 10 por mil, en tanto que el tramo 5 y tramo 6A, tienen riesgos por pérdidas directas que son del orden de 37 por mil. La alta vulnerabilidad económica directa del tramo 6A, está asociada con la carretera construida en materiales térreos a cielo abierto, (la alta vulnerabilidad por lluvia del tramo 6A podría tener su asiento en el sitio el Mirador), más que la vulnerabilidad asociada con los puentes, en tanto que la alta vulnerabilidad del tramo 5 está asociada con otro tipo de infraestructura vial, específicamente en los túneles Quebrada Blanca 1 y 2.

En la Figura 7 se refleja que el único tramo que presenta vulnerabilidad económica indirecta es el tramo 5, por lo que esta curva es la única que cambia con relación a la Figura 6. Lo anterior es debido principalmente a los cierres por los derrumbes del sector de los Picos, en algunas quebradas para manejo de emergencias y cierres en los túneles de Quebradablanca 1 y 2, reflejándose en la alta pendiente de la curva correspondiente al tramo 5. En este tramo se incrementa la vulnerabilidad desde el 37 por mil (directa) hasta el 83 por mil (directa mas indirecta). Las obras del tramo 5 fallan repentinamente, de manera frágil. Por tanto, se considera que el incremento en las pérdidas indirectas de una vía que se manifiesta en la vulnerabilidad indirecta se puede encontrar asociado con la *fragilidad* de los materiales.

Una de las interpretaciones inmediatas de riesgo igual a 37 por mil en el tramo 5, es que anualmente en promedio se ha necesitado invertir en la carretera 0.037 veces el valor de construcción de ese tramo para mantenerla con los niveles de transitabilidad actuales. Si se requiere mejorar los niveles de transitabilidad, el siguiente año habrá que realizar inversiones mayores.

Las curvas de vulnerabilidad económica por lluvias están fuertemente influenciadas por las características geotécnicas y geológicas de la carretera o tramo de carretera. Es fácil saber que a medida que aumenta la lluvia, en un mismo material o zona, la vulnerabilidad económica aumenta. Sin embargo, la pendiente de esa curva para cada nivel de lluvia dependerá de características particulares como son los procesos erosivos y de fenómenos de remoción en masa que se están presentando en cada sitio puntual. A manera de ejemplo, si un tramo de carretera está ubicado en un macizo

rocoso de alta resistencia con altos niveles de lluvia, la vulnerabilidad económica será baja en comparación con un tramo de carretera localizado en un macizo rocoso de baja resistencia y con niveles de lluvia menores.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de la metodología sugerida para desarrollar curvas de vulnerabilidad por lluvias y estimar el riesgo indica tres aspectos fundamentales:

1. Un estimativo del dinero que se debe invertir en cada tramo de la carretera para mantener los índices de transitabilidad que se han presentado durante los años que se realizó la evaluación de la vulnerabilidad económica, basados en datos históricos metódicamente organizados. Además, si se observa que es necesario aumentar los niveles de transitabilidad obtenidos durante los últimos años, se sabrá con las curvas de vulnerabilidad por lluvia que es necesario aumentar la inversión en ese tramo, mas allá de lo que se ha hecho históricamente.

2. Provee una comparación de la vulnerabilidad para diferentes carreteras, o tramos de carreteras, con lo que se tendrá una herramienta objetiva para priorizar los recursos para la infraestructura vial de un país.

3. Si se implementa esta metodología de modo tal que sea dinámica en el tiempo, con capacidad de actualización de la base de datos de inversiones (pérdidas) en cada tramo, puede observarse la buena gestión de la entidad encargada del mantenimiento y operación de la carretera, ya que se entrega un indicador tangible de los beneficios de los dineros invertidos en la carretera al disminuir la vulnerabilidad directa e indirecta. Por supuesto, si está en capacidad de presentar un indicador de gestión positivo, también está en capacidad de presentar deficiencias en la gestión de la infraestructura vial.

4. Las curvas de vulnerabilidad económica dependen de las características geométricas de la carretera, de la lluvia en el sitio y de las características geomecánicas del macizo rocoso. En cuanto a la influencia de la geología podemos decir que la *fragilidad* también parece afectar la vulnerabilidad por pérdidas indirectas. En otras palabras consideramos que la vulnerabilidad depende directamente de la deformabilidad y adicionalmente de la fragilidad de los materiales, y desde luego inversamente de la resistencia.

Se recomienda sectorizar la red vial nacional en función de la Vulnerabilidad Económica. Este es un indicador coherente y tangible para la gestión de construcción y operación de carreteras.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar el agradecimiento a los revisores por sus muy acertadas críticas y sugerencias, con lo que se pudo mejorar ostensiblemente el aporte del presente artículo.

## REFERENCIAS

- Berdica, K. (2002). "An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done". *Transport Policy*. Vol. 9, pp. 117-127.
- BILPOR (2005). Puentes existentes carretera Bogotá - Villavicencio.
- Coburn A., R. Spence, y A. Pomonis. (1994). *Vulnerability and risk assessment*, Segunda edición. Cambridge Architectural Research Limited, The Oast House, Malting Lane, Cambridge, Reino Unido.
- COVIANDES (2005). Planta carretera Bogotá - Villavicencio. Bogotá, Colombia.
- Celis, A. (2005). Geología de la carretera Bogotá Villavicencio. Comunicación personal.
- Dalzien, E. y A. Nicholson (2001). "Risk and impact natural hazards on a road network", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127, No. 2. pp. 159-199.
- EERI Committee on Seismic Risk (1984). "Glossary of terms for probabilistic seismic risk and hazard analysis", *Earthquake Spectra*, Vol. 1, No. 1, pp. 33-40.
- EERI Committee on Seismic Risk (1989). "The basics of seismic risk analysis", *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 4, pp. 675-702.
- Isaaks, E.H. y Srivastava, R.M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561 p.

- INVIAS (1996). "Patrimonio Vial Red Carretera Nacional", Instituto Nacional de Vías, Ministerio de Transporte, Subdirección de Conservación, República de Colombia.
- INVIAS (2005). Subdirección de la red nacional. Puentes de la red nacional SIPUCOL. Bogotá, Colombia.
- Jelenius, E., Petersen T., y Mattson L. (2006). "Importance and exposure in road network vulnerability analysis", *Transportation Research Part A*, Vol. 40, pp. 537-560.
- Munich Re (1990). Tarifa de seguro para los seguros de todo riesgo para contratistas e incendio y obras civiles terminadas.
- UNDRO (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis*. Report of expert group meeting, Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, Geneva, Switzerland, 9-12 July, pp. 48.