

## 6 DEFINICION DE FACTORES E INDICADORES

Entendido el riesgo como el resultado de hacer la convolución de la amenaza y la vulnerabilidad, el Indice de Riesgo,  $IR$ , para cada segmento (o en general para cualquier unidad de análisis que se seleccione) se definió con base en dos factores: un Factor de Amenaza,  $A$  y un Factor de Vulnerabilidad,  $V$  (Figura 6.1), los cuales se describen a continuación basados en sus componentes e indicadores:

### 6.1 AMENAZA, $A$

El Factor de Amenaza,  $A$ , se obtuvo de agregar dos componentes dado el tipo de información disponible, que en este caso corresponden a Susceptibilidad de Eventos,  $A_S$ , y la Historia de Eventos,  $A_H$ . Estos componentes se describen a continuación.

#### 6.1.1 Susceptibilidad de eventos, $A_S$

La Susceptibilidad de Eventos integra los indicadores que relacionan los agentes que suscitan el posible desarrollo de eventos. La información disponible permite la consideración, para el alcance establecido en el presente estudio, de tres tipos de agentes, que se caracterizan mediante los siguientes indicadores:

#### *6.1.1.1 Aceleración Sísmica Pico efectiva, $X_{A1}$*

La información utilizada para este estudio son los valores de aceleración que se han definido en la norma NSR-98 [Ref. 10.1] y que se presentan en la Figura 6.2. El valor de aceleración que se asignó a cada segmento de la Red Vial se obtuvo de la siguiente manera: digitalizado el mapa de aceleraciones de la Norma NSR-98, se identificó cada zona del mapa como un polígono independiente con un único valor de aceleración. Utilizando el sistema de información geográfica se superpusieron el mapa de aceleración y el de la red vial logrando crear el atributo de aceleración dentro de la base de datos del mapa de la red vial, logrando así asignarle a cada segmento un valor de aceleración sísmica efectiva. En el Anexo 6.1 se presenta el resultado de esta asignación.

#### *6.1.1.2 Intensidad de lluvias en mm anuales, $X_{A2}$*

La intensidad de las lluvias se obtuvo con base en el mapa de Precipitación publicado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, en su publicación Atlas de Colombia [Ref.10.15]. En la Figura 6.3 se reproduce este mapa de precipitación. El valor de precipitación que se asignó a cada segmento de la Red Vial se obtuvo digitalizado el mapa de precipitaciones e identificando cada zona del mapa como un polígono independiente con valor único de precipitación. De igual forma que en el caso anterior, al superponer el mapa de precipitación y el de la red vial se logra crear el atributo de precipitación dentro de la base digital del mapa de la red vial, obteniendo así, asignarle a cada segmento un valor de precipitación anual. En el Anexo 6.1 se presenta la base de datos correspondiente.

#### 6.1.1.3 Factor Pendiente del terreno, $X_{A3}$

El valor de pendiente del terreno que se consideró en el estudio corresponde al valor de la pendiente del terreno transversal al eje longitudinal de la vía, pues es esta junto con las características geológicas del suelo los que determinan la estabilidad de los taludes.

La Subdirección de Conservación del INVIA con el propósito de estimar el costo del patrimonio vial desarrolló el programa DIARIO 3, el cual contiene dentro de sus bases de datos información sobre el tipo de terreno sobre el cual están construidos los tramos viales. Dentro de la tipología de los terrenos se presentan 4 clases: planos, ondulados, montañosos y escarpados.

Cada tipología tiene asociado un valor de pendiente transversal y longitudinal. En el Terreno Plano (1) se tienen de ordinario pendientes transversales a la vía menores al 5%. El Terreno Ondulado (2) se caracteriza por tener pendientes transversales del 6% al 12%. En el Terreno Montañoso (3) las pendientes transversales a la vía suelen ser del 13% al 40%. En el Terreno Escarpado (4) las pendientes transversales a la vía son mayores al 40%. Esto permite asociar un rango de valores de pendiente con el tipo de terreno para cada tramo. Los valores del indicador asociado a cada uno de los segmentos (unidad básica de análisis) se obtuvieron del valor del tramo respectivo asignándoles directamente el mismo valor del tramo.

En esta etapa del proyecto, resulta conveniente plantear un índice alternativo que se ha identificado como *Probabilidad de deslizamientos*,  $X_{A4}$ , y que representaría la probabilidad global de que ocurriera la falla de un talud determinado en una zona determinada del país, dada una amenaza sísmica establecida, una función de precipitación, una topografía y unas características geológicas determinadas. Esta metodología alterna resulta de sumo interés para efectos del presente proyecto ya que el índice determinado de esta manera representa una

medida adecuada de la amenaza relativa de deslizamiento de taludes en los diferentes segmentos de la red. Sin embargo, dada su relativa complejidad queda por fuera del alcance del presente trabajo y esto sería objeto de estudios posteriores con INVIA.

El Anexo 6.1 presenta la base de datos referente a estos indicadores para cada uno de los segmentos de análisis.

### **6.1.2 Historia de eventos, $A_H$**

Una manera alternativa de considerar la amenaza sobre el sistema vial consiste en estudiar la historia de eventos ocurridos en el pasado en los diferentes tramos de la Red Vial Nacional. Como se mencionó anteriormente, se recurrió principalmente a información de periódicos y diarios donde se reporta siempre cualquier evento que pueda llegar a afectar a los usuarios del sistema (transportadores y particulares) o a la comunidad en general. Se investigaron en total 6 periódicos de la prensa nacional en un período comprendido entre 1987 y 1997. La información fue consultada en los archivos de la Hemeroteca Nacional, en la Hemeroteca de la Biblioteca Luis Angel Arango y de la Universidad Nacional. Se recorrió cada una de las publicaciones día por día y una vez detectado un evento de interés se registró en el formato que se incluye en la Figura 6.4. Con esta metodología se logró conformar una base de datos de más de 3000 eventos distribuidos en todo el territorio Nacional. Estos eventos se caracterizaron con base en el tipo de daño, en su magnitud y en sus efectos como Eventos Severos o Moderados, conformando los indicadores de este componente para cada segmento de análisis. Los indicadores asociados son:

*6.1.2.1 Número de Eventos Moderados,  $X_{A5}$*

*6.1.2.2 Número de Eventos Severos,  $X_{A6}$*

Utilizando la información recogida en el inventario de Eventos un Evento Moderado se definió como aquel que no importando su localización, ni su tipología de daño, ni su agente generador, tuviera dentro de sus Características del Daño el valor de *Parcial* con relación al *Tipo de Daño* y de *Menores o Medios* con relación a los *Efectos* causados. Por otro lado un Evento Severo se definió al tener el valor de *Total* en el *Tipo de Daño* y el valor de *Graves* relacionado con los *Efectos* causados sin importar su localización, su tipología de daño o su agente generador.

En el Anexo 6.1 se presenta la base de datos recolectada. En los Mapas No. 2 y 3 se presenta gráficamente la densidad relativa de eventos por tramos en el país.

## **6.2 VULNERABILIDAD, V**

El índice asociado con la vulnerabilidad se obtiene de agregar tres componentes que de acuerdo con la información disponible reflejarán las debilidades y fortalezas físicas y funcionales, los valores de exposición del sistema y el impacto social y económico al enfrentar emergencias. Se definieron como componentes del Factor de Vulnerabilidad los siguientes: Exposición, Impacto por Cierre y Dificultad de Recuperación, cada uno de los cuales se describe brevemente a continuación:

### **6.2.1 Exposición, $V_E$**

La exposición se refiere en general, a los elementos y valores expuestos ante las amenazas en cada segmento o tramo. De manera indirecta dimensiona valores estratégicos de orden económico e institucional relacionados con la dependencia o importancia de dichos elementos no sólo para el segmento sino para el tramo particular o para la regional y para la nación, que

en caso de ser afectados pueden significar graves traumatismos que comprometen la estabilidad social y económica de una zona en particular o del país entero. Se utilizaron varios indicadores que se identificaron para cada segmento. Dichos indicadores son los siguientes:

#### *6.2.1.1 Valor Medio del Patrimonio Vial, $X_V$ ,*

El valor Medio del Patrimonio Vial se obtuvo con la información consignada en la publicación Patrimonio Vial – Red Carretera Nacional elaborada por la Subdirección de Conservación del INVIA [Ref. 10.16]. Estos valores hacen referencia a costos actuales, máximos, mínimos y medios de las vías de cada regional, cada uno de los cuales obedece a una estimación y definición particular que la subdirección de conservación obtuvo conforme a los propósitos de su estudio. El valor máximo del patrimonio se relaciona al costo del conjunto de segmentos recién construidos con un nivel de calidad acorde con las condiciones del terreno, tipo de superficie y características geométricas, según el volumen de usuarios. El valor mínimo permisible de un tramo vial es el que corresponde a las peores condiciones admisibles, conforme a criterios técnicos y económicos. El valor que se propuso como representativo del patrimonio es el valor medio debido a que este valor recoge un concepto realista el cual considera que no toda la red puede mantenerse en un nivel “muy bueno” de estado, no sólo por la dificultad en la asignación de los recursos para cumplir estos propósitos sino también por que esto puede resultar antieconómico. Así el valor medio permite identificar un valor intermedio entre un valor máximo posible y el valor mínimo técnicamente permisible.

Debido a que los valores disponibles para este índice están relacionados con los tramos de las diferentes vías de la Red Vial Nacional y ya que el propósito es obtener un valor de patrimonio para cada segmento de la Red, se calculó este valor como el valor total ponderado por la longitud del segmento con relación a la longitud total del tramo así:

$$ValorSegmento = \frac{ValorTramo * LongitudSegmento}{LongitudTramo}$$

Donde:

Valor Segmento: Valor medio patrimonial del segmento, en \$ millones.

Valor Tramo: Valor medio patrimonial del segmento, en \$ millones.

Longitud Segmento: Distancia en Km de cada segmento.

Longitud Tramo: Distancia en Km de cada tramo.

En el Mapa No. 4 se presentan los resultados obtenidos para esta caracterización utilizando como unidad de análisis el tramo. En el Anexo 6.1 se presenta la base de datos correspondiente.

#### 6.2.1.2 Número de Puentes Tipo 1 ( $L > 80$ m, pilas intermedias), $Xv_2$

La información referente a puentes se obtuvo directamente de los datos suministrados por la Oficina de Puentes del INVIA, quienes tienen identificados 1.912 puentes en toda la Red Vial. Dentro de la base de datos los puentes tienen una georeferenciación lo que permite ubicarlos geográficamente con respecto a las vías y visualizarlos en Mapas, cabe anotar que existen inconsistencias en las coordenadas de la georeferenciación. [Ref. 10.27].

Con este indicador se quiere cuantificar el número de puentes de longitud total mayor de 80 m caracterizados en su gran mayoría por el empleo de pilas intermedias y la existencia de más de dos luces. A esta clase de puentes se les denominó Tipo 1 (uno) por ser éstos los de mayor luz, mayor costo en construcción y reparación y por lo tanto son los puentes con mayor exposición.

El valor del número de puentes corresponde a la suma de los puentes con esta característica que existen en cada segmento.

#### *6.2.1.3 Número de Puentes Tipo 2 ( $50 \text{ m} < L < 80 \text{ m}$ , torres y cables), $Xv_3$*

Este indicador cuantifica el número de puentes de longitud total entre 80 y 50 m se caracterizan en su mayoría por el uso de torres y cables como parte de su estructura y su tablero está conformado en general por una sola luz. A esta clase de puentes se les denominó Tipo 2 (dos). El valor del número de puentes en cada unidad de análisis, corresponde a la suma de los puentes con estas características que existen en cada segmento.

#### *6.2.1.4 Número de Puentes Tipo 3 ( $L < 50 \text{ m}$ , apoyos simples), $Xv_4$*

Este indicador cuantifica el número de puentes de longitud total menor de 50 m. Son puentes de una sola luz y los apoyos sobre el terreno son simples. A esta clase de puentes se les denominó Tipo 3 (tres). El valor del número de puentes en cada unidad de análisis, corresponde a la suma de los puentes con esta característica que existen en cada segmento.

Los Mapas No. 5,6 y 7 presentan los diferentes tipos de puentes con respecto a la red vial. En el Anexo 6.1 se incluye la información por segmentos correspondiente.

#### *6.2.1.5 Estado de los Puentes (0 a 6), $Xv5$*

El indicador de estado del puente se asocia como una característica del segmento con relación a la existencia de determinado número de puentes de determinado tipo y al estado en general

de cada uno de los puentes, esta última información corresponde a datos suministrados por la Oficina de Puentes del INVIA [Ref. 10.27]. El valor del indicador se obtiene de la siguiente forma:

1. Se totalizan todos los puentes de cada tipo en cada segmento.
2. Con la información sobre el estado general de cada puente tomada de las bases de datos del inventario de puentes, se estableció un valor de estado promedio para los puentes de cada tipología en cada una de las regionales.
3. Se da un valor de importancia a cada tipología, pretendiendo con ello darle peso dentro del indicador a los puentes que por sus características sobresalen con respecto a otros. La importancia se definió así: Tipo 1 = 50%, Tipo 2 = 30% y Tipo 3 = 20 %.
4. El valor del indicador para cada segmento se calcula de la siguiente manera:

$$EstadoPuente = \sum_{i=1}^3 \#Tipo_i * imp_i * EstadoPromedio_i$$

Donde:

$\#Tipo_i$  = Número de puentes de cada tipología, sobre cada segmento.

$imp_i$  = Valor porcentual de importancia de cada tipología.

$EstadoPromedio_i$  = Valor promedio del estado general del los puentes de cada regional.

En el Anexo 6.1 se incluye la información resultante.

#### 6.2.1.6 *Valor de Inversiones Preventivas y Remediales, $Xv_6$*

Los valores de las inversiones preventivas y remediales se obtuvieron de los archivos de la Oficina de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias del INVIA. La información

suministrada comprende los años 1995, 1996 y 1997; a pesar de ser muy diverso el objeto de las inversiones se puede clasificar como: Mantenimiento (Vías, Puentes), Emergencias (Derrumbes, Puentes Provisionales), Pavimentación, Operativos de Control, Obras varias (Muros de contención, bermas, cunetas, box coulvert, estabilización de taludes, emergencias generales). El indicador recoge un valor equivalente a la suma de todas las inversiones que se ubicaron en cada segmento. La manera como se asigna un valor de inversión a cada segmento depende del objeto o propósito de la inversión, ponderando el valor por la longitud de cada segmento de la carretera donde se realizó la inversión. El ejemplo aclara el procedimiento.

*Ejemplo:*

Si el objeto de la inversión son obras de protección de la banca y obras complementarias en la vía Cali - Loboguerrero, entonces se coloca un porcentaje de la inversión a cada segmento que comprende dicha vía de acuerdo con la longitud del segmento.

*Objeto :* Obras de protección de la banca y obras complementarias en la vía Cali - Loboguerrero.

*Valor de la inversión:* \$ 300'000.000

*Regional :* Valle del Cauca.

<i>Segmento</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Valor de inversión</i>
Cali - Km 21	15	\$ 87'378.641
Km 21 - Dagua	21.5	\$ 125'242.718
Dagua - Loboguerrero	15	\$ 87'378.641
<hr/>		\$ 300'000.000

Si el objeto de la inversión está asignado a un segmento en particular, entonces se coloca el 100% de la inversión a dicho segmento.

Algunas inversiones no se pudieron ubicar dentro de los segmentos de la red por razones como las siguientes.

- El concepto de la inversión hace referencia al nombre de un puente vehicular, este nombre no tiene una referencia geográfica, dificultando así su localización.
- El concepto de la inversión hace referencia a un segmento de vía que no está dentro de los segmentos que corresponden a los que conforman la Red Vial perteneciente al INVIA.
- El concepto de la inversión no hace referencia al segmento o tramo particular donde se ejecutó.
- Algunos conceptos correspondían a rubros de inversión que se destinaron en la parte administrativa.

La Tabla 6.1 muestra un balance de la localización de las inversiones sobre los segmentos.

**TABLA 6.1**  
**BALANCE DE ASIGNACION DE INVERSIONES A SEGMENTOS**

Año	Archivos	Registros Totales	Registros no Asignados	Valor Total	Valor Asignados
1995	INVE2895.xls	19	2	1.240.000.000	1.204915219
1996	INVE2896.xls	166	32	14.995.414.415	10.677.921.293
	INVE9096.xls	15	3	2.483.300.268	1.993.100.268
1997	INVE7897.xls	192	36	15.500.000.000	12.057.044.745

Toda la información asociada con estos indicadores proviene de los archivos de información del INVIAS [Refs. 10.22, 10.23]. En el Mapa No. 8 se presenta la información recolectada a nivel de tramos. El Anexo 6.1 presenta la base de datos de la información relacionada a nivel de segmentos.

### 6.2.2 Impacto por Cierre, $V_I$

Este componente se refiere a los efectos sociales y económicos que un cierre determinado tiene sobre una zona en particular, sobre la regional o sobre el país. Aún cuando podrían considerarse otras variables adicionalmente, se tuvieron en cuenta aquellas con información confiable para cada unidad de análisis (segmento, tramo o regional) y que reflejaran en lo posible aspectos diferentes, aun cuando en términos estrictos todas están relacionadas entre sí. Se consideraron los siguientes indicadores:

6.2.2.1 *Tránsito Promedio Diario, TPD, automóviles,  $Xv_7$*

6.2.2.2 *Tránsito Promedio Diario, TPD, buses,  $Xv_8$*

6.2.2.3 *Tránsito Promedio Diario, TPD, camiones,  $Xv_9$*

La información de tráfico promedio diario, TPD, se obtuvo de las cartillas de Volumenes de Tráfico 1996 que la Subdirección de Conservación edita anualmente [Ref.10.18]. Para la asignación de los valores de TPD a los segmentos, se relacionaron geográficamente las estaciones de conteo con los segmentos. Esta relación permitió que la información referida a cada estación de conteo se pudiera asociar a cada segmento. Gran parte de los segmentos tenían una relación uno a uno con alguna estación pero en el caso de segmentos que por su ubicación no tuvieran una estación asociada directamente, se le asignó el código de la estación más cercana. Algunas estaciones no tenían registro de tráfico, por lo cual, a los segmentos correspondientes se le asignó el código de una estación de la misma regional que estuviese relacionada a otro segmento de características de tráfico similares. Los valores empleados en el análisis corresponden al número de autos, buses y camiones proyectados al año para cada segmento de análisis.

Los valores de tráfico de autos, buses y camiones asignados a cada tramo se obtuvieron de promediar los valores de los segmentos correspondientes. En los Mapas No. 9, 10 y 11 se presentan los valores de TPD (proyectados al año). En el Anexo 6.1 se presentan los valores de los índices resultantes para cada segmento. En el Anexo 6.2 se presenta una muestra de la base de datos desarrollada para el cálculo de estos indicadores.

#### *6.2.2.4 Carga Movilizada en Ton, $Xv_{10}$*

Se pretende con este indicador involucrar de la manera más palpable otro ingrediente económico al análisis y considerar el impacto por cierre que causaría algún evento sobre la red. Las fuentes de información consultadas no permiten definir con exactitud los valores de carga movilizados sobre las carreteras del país. Hasta la fecha la Subdirección de Transporte de Carga Terrestre del Ministerio de Transporte ha venido elaborando el boletín de las encuestas Origen-Destino [Ref.10.31], la cual busca recopilar información relacionada con la movilización de carga por carretera en Colombia y lograr estadísticas referentes a origen, destino, productos transportados, distancia recorrida, combustible y tipos de vehículos utilizados.

Al no tener registros de carga por ruta o tramo y al encontrar tantas posibles rutas que conecten dos puntos (origen y destino), la asignación de la carga a cada segmento no puede realizarse de manera confiable

#### *6.2.2.5 Tipo de Vías por Importancia (0, 1, 2), $Xv_{11}$*

Este indicador define el criterio de importancia que tiene cada segmento de la Red Vial Nacional vinculado con la posibilidad de la ocurrencia de un cierre y del impacto que sobre el sistema causaría este evento en materia de movilización y comunicación. Ya que esta calificación es de indole subjetiva se acudió al concepto de expertos, personas con gran idoneidad y conocimiento de las vías, las cuales dieron la valoración a los segmentos en forma cualitativa, tomando valores 0, 1 o 2 donde 0 equivale a una calificación de poca importancia y 2 implica una gran importancia. Esta valoración se puede apreciar en el anexo 6.1.

### 6.2.3 Dificultad de Recuperación, $V_D$

La dificultad de recuperación está asociada a la capacidad de respuesta o recuperación posterior al evento, por lo tanto en este caso se refiere a la disponibilidad de recursos físicos, humanos y al nivel de organización para la respuesta en caso de emergencia. Para su valoración se escogieron sólo algunas variables que podrían representar los factores de más fácil valoración, no obstante, es importante mencionar que en términos estrictos algunas de ellas están relacionadas entre sí y en ocasiones tienden a cuantificar aspectos comunes.

Dada la dificultad en la evaluación cuantitativa de los índices  $Xv_{12}$ ,  $Xv_{14}$ ,  $Xv_{15}$ ,  $Xv_{16}$  y  $Xv_{17}$ , éstos fueron evaluados por personal experto del INVIAST en forma cualitativa, mediante la asignación de un índice global para cada segmento, que puede tomar los valores 0, 1 o 2 donde 0 es la menor calificación y 2 implica la mayor calificación del aspecto considerado en cada uno de los indicadores sobre cada una de las unidades de análisis. Se definieron los siguientes indicadores:

#### 6.2.3.1 *Distancia a maquinaria más cercana (0, 1, 2), $Xv_{12}$*

Este indicador permite evaluar la capacidad de respuesta de los centros de atención observando que tan lejano se encuentra un segmento con relación a la ubicación de los centros de atención equipados con maquinaria para actuar en caso de una emergencia. Los indicadores relacionados con la dificultad de recuperación, son valorados de manera subjetiva por un grupo de expertos del INVIAST, debido a que son indicadores que reflejan características de funcionalidad y operatividad del sistema que no son fácilmente cuantificables. En el Anexo 6.1 se presenta la información detallada al respecto.

### 6.2.3.2 Accidentalidad, IP, $Xv_{13}$

El valor de Indice de Peligrosidad que se le dio a cada segmento se obtuvo del procesamiento de la información suministrada para tal fin por la Subdirección de Conservación, la Oficina de Desarrollo Tecnológico del INVIA y la Policía de Carreteras. Esta información hace referencia al número de accidentes, heridos y muertes que se han registrado en las carreteras del país en los últimos años. El cálculo del Indice de Peligrosidad se realizó de la misma forma en que fue obtenido en el estudio Epidemiológico de la Accidentalidad en las Carreteras Nacionales [Ref. 10.19]. La ecuación que define el Indice de Peligrosidad se puede expresar así:

$$IP = \frac{(A + M + H) * 1.000.000}{Long * TPD * 360}$$

Donde: IP = Indice de Peligrosidad.

A = Número total de Accidentes.

M = Número total de Muertes.

H = Número total de Heridos.

Long = Longitud total del tramo considerado.

TPD = Tránsito Promedio Diario.

El anexo 6.1 presenta los valores resultantes de las variables reales para cada segmento. En el Anexo 6.3 se presenta una muestra de la base de datos desarrollada para el calculo del índice. En el Mapa No. 12 se presentan los valores del indice obtenidos al nivel de tramos.

#### *6.2.3.3 Dificultad de acceso por relieve (0, 1, 2), $Xv_{14}$*

Este indicador relaciona las condiciones topográficas del sistema vial con la capacidad de respuesta de los organismos de emergencia y control para la atención en caso de un posible evento que produzca alteraciones en la normal operación del mismo. Los expertos del INVIAST valoraron esta situación para cada segmento incluido en el estudio. En el Anexo 6.1 se presenta la información recopilada.

#### *6.2.3.4 Falta de Redundancia (0, 1, 2), $Xv_{15}$*

La redundancia de una segmento o tramo está relacionada con la posibilidad de utilización de vías alternas cercanas que permitan absorber la totalidad del tráfico de la vía interrumpida sin mayores traumatismos con una capacidad equivalente y sin un aumento desmesurado de la distancia recorrida. El indicador se define como la falta de redundancia del segmento o tramo para mantener compatible el sentido de la vulnerabilidad con las otras variables. Los expertos del INVIAST valoraron este indicador para cada segmento incluido en el estudio. En el Anexo 6.1 se presenta la información recopilada.

#### *6.2.3.5 Factor Puente (0,1, 2), $Xv_{16}$*

Al ser los puentes estructuras cuya función es comunicar puntos de difícil acceso y al tener un proceso de construcción y reparación relativamente lento y dispendioso, los segmentos que contienen puentes frente a los que carecen de ellos, tienen una mayor dificultad en la

recuperación frente a un eventual evento que genere situaciones que afecten la función del sistema. Los valores de este indicador para cada uno de los segmentos fueron suministrados por el personal experto del INVIA, basados en su conocimiento del estado actual de la red vial y de la capacidad de respuesta de los organismos de emergencias. En el Anexo 6.1 se presenta la información recopilada.

#### *6.2.3.6 Factor Orden Público (0,1, 2), $X_{V,7}$*

Debido a que la función y el estado dinámico del sistema de la Red Vial afecta el entorno social donde se desarrolla y a su vez se ve afectado por el mismo, se incluye dentro del análisis el factor orden público, referido principalmente a la eventual acción de grupos armados que obligan al cierre de determinadas vías, en algunos casos complicando las labores de reparación y mantenimiento por parte de los organismos de emergencias. Los valores del indicador fueron definidos por el personal experto del INVIA y se presentan en el Anexo 6.1 a nivel de segmentos.

## 7 PROCEDIMIENTO DE EVALUACION

El procedimiento para cuantificar un índice que permita realizar la valoración relativa de la amenaza,  $A$ , de la vulnerabilidad,  $V$  y por lo tanto del Indice de Riesgo,  $IR$ , de una unidad de análisis (segmento, tramo o regional), incluye las siguientes fases o etapas:

- a) Una investigación sistemática de todos los factores a considerar, de carácter técnico, social, económico, político o cultural que contribuyen a la vulnerabilidad o al riesgo de la unidad de análisis, tal como se ilustró anteriormente.
- b) El desarrollo de un modelo matemático para la organización de dichos factores que permita entender cómo los mismos están relacionados y cómo su acumulación hace más vulnerable o aumenta el riesgo en la unidad de análisis.
- c) La elaboración de factores o indicadores simples y cualitativos que sinteticen de manera medible el marco conceptual, para efectos de análisis cuantitativos.
- d) La combinación o convolución matemática en un índice de valoración de la vulnerabilidad o riesgo.
- e) El análisis comparativo de cada una de las unidades de análisis para efectos de categorización.

Dado que la unidad de análisis de este estudio es el segmento, los índices de cada indicador, componente y factor se determinaron para cada uno de los segmentos constituyentes de la red vial. Estos mismos índices pero referidos a cada tramo y a cada regional, son el resultado de

ponderar los índices de los segmentos en función del porcentaje de la longitud de cada uno con respecto a la longitud total de segmentos en el tramo y en función del porcentaje de la longitud de cada tramo respecto a la longitud total en la regional.

## 7.1 ENFOQUE

El índice de Riesgo relativo **IR**, se puede estimar como una combinación lineal así:

$$IR = \sum w_i x_i$$

donde  $x_i$  son los indicadores que representan los factores que contribuyen a la vulnerabilidad o el riesgo y  $w_i$  son sus pesos de importancia relativa en el índice general o total de vulnerabilidad o riesgo.

Expresar el resultado como una combinación lineal implica que no existe interacción entre los indicadores o entre los indicadores y los pesos utilizados para la ponderación, aspecto que puede ser motivo de debate en muchos casos. No obstante, casi todos los índices de este tipo desarrollados hasta la fecha usan un enfoque basado en una combinación lineal y la búsqueda de otros enfoques ha permitido concluir que la combinación lineal es la mejor disponible. Hacer de un índice de vulnerabilidad o riesgo una función no lineal puede llegar a ser más realista, pero no es claro qué tipo de función podría ser y su complejidad asociada hace que el enfoque termine por ser inconsistente con el objetivo de buscar una metodología sencilla para obtener un índice fácil de evaluar y de fácil entendimiento.

Ahora bien, la combinación lineal requiere escalar los indicadores en unidades commensurables y determinar el peso asociado con cada indicador, aspectos que se tratan a continuación.

## 7.2 ESCALONAMIENTO

Antes de integrar los indicadores componentes del índice de vulnerabilidad o riesgo mediante una combinación lineal, éstos deben ser escalados en unidades compatibles de medida. El estado de puentes y la accidentalidad, por ejemplo, no pueden ser sumados directamente, porque en el primero se utiliza parámetros cualitativos y en el segundo unidades propias del índice. Suponiendo que un indicador tiene un valor de diez para una unidad de análisis y veinte para otra, el escalamiento interpreta que existe una diferencia de diez unidades al compararlo con otros valores del indicador. Si otras unidades de análisis tienen valores entre diez y once, la interpretación sería diferente si ellas tienen valores entre cero y mil. El escalonamiento es estrictamente una operación matemática que hace parte del proceso de calibración. Cinco opciones de escalonamiento se presentan a continuación:

Cada indicador puede ser traducido sin unidades mediante su normalización con respecto a:

1. El máximo y mínimo valor considerado posible para el indicador:

$$x_{ij}' = (x_{ij} - \text{min possible}_i) / (\text{max possible}_i - \text{min possible}_i)$$

2. Los máximos y mínimos valores observados para el indicador en cierta muestra de unidades de análisis (segmentos, tramos o regionales):

$$x_{ij}' = (x_{ij} - \text{min observed}_i) / (\text{max observed}_i - \text{min possible}_i)$$

3. La media:

$$x_{ij}' = (x_{ij} - \bar{x}_i) / s_i$$

4. La media menos dos desviaciones estándar:

$$x_{ij}' = \{x_{ij} - (\bar{x}_i - 2s_i)\} / s_i$$

Las variables  $x_{ij}$  y  $x_{ij}'$  son el dato crudo y el valor escalado para el indicador  $i$  y segmento  $j$ , respectivamente;  $\bar{x}_i$  y  $s_i$  son la media y la desviación estándar de una muestra de segmentos, tramos o regionales para el indicador  $i$ . Cada una de las formulaciones antes mencionadas se refiere a indicadores directamente proporcionales al índice de vulnerabilidad o riesgo. También se pueden utilizar indicadores inversamente proporcionales que se expresarían como  $(-x_{ij})$  ó  $(1 - x_{ij})$ .

Una quinta posibilidad, es la determinación de una función para cada indicador, con el fin de relacionar el dato crudo del indicador con el índice de vulnerabilidad o riesgo directamente. Esta opción permite desarrollar tanto el trabajo de escalar como ponderar. Aunque este tipo de método permite la consideración de no linealidades, las funciones tienen que determinarse subjetivamente haciendo el escalonamiento y la ponderación en un solo paso, lo que hace difícil conocer si la función fue determinada por la importancia de la ponderación, la importancia del escalonamiento o una combinación de ambos. En ocasiones, como la presente, es preferible separar la ponderación del escalonamiento y aislar la subjetividad de la relativa importancia de los pesos de los factores. En esta técnica, el analista fácilmente puede darse cuenta si los resultados están de acuerdo con sus estimaciones subjetivas y alterarlas si no está de acuerdo con los resultados.

En las alternativas 1 y 2, cada segmento, tramo o regional se evalúa relativamente con respecto al más alto y más bajo valor de vulnerabilidad o riesgo. En esta modalidad el índice de vulnerabilidad o riesgo es totalmente dependiente de los valores máximos y mínimos de cada

indicador y por lo tanto son peligrosamente sensativos a la calidad de la estimación (alternativa 1) o de los datos (alternativa 2) usados para determinar dichos valores. La alternativa 3 es preferible en muchos casos a las opciones anteriores por dos razones: primero, no se confunde el escalonamiento con la ponderación y, segundo, evalúa directamente cada área o segmento (unidad de análisis) relativamente con respecto a todas las demás (a través de la media y la desviación estándar). Las alternativas 1 y 2 realizan la misma comparación por la valoración relativa de cada segmento, tramo o regional con la "mejor" y el "peor" segmento, tramo o regional y por transitividad, con cada una de las otras. En el proceso, sin embargo, los resultados desarrollan una sensitividad indeseable a los valores del indicador para esas unidades de análisis. Finalmente, la alternativa 4 es preferible a la 3, aunque las dos opciones son análogas matemáticamente. Simplemente utilizan diferentes técnicas de comparación, la media y la media menos dos desviaciones estándar. Aunque las dos alternativas son igualmente correctas, el uso de una u otra depende de la interpretación de sus resultados. Con la alternativa 3, en una mayor proporción algunos valores del índice de vulnerabilidad o riesgo pueden ser negativos, haciendo difícil su interpretación intuitiva, circunstancia que favorece la alternativa 4 como la mejor elección.

### **7.3 PONDERACIÓN**

Una vez los indicadores son commensurables, su ponderación debe ser determinada. El peso de cada indicador ilustra que tan importante es el indicador con respecto a los demás en la determinación del índice de vulnerabilidad o riesgo. Muchas investigaciones usualmente se hacen para demostrar cómo cada factor juega un papel en la vulnerabilidad o el riesgo, infortunadamente, el conocimiento acerca de la vulnerabilidad y el riesgo está disperso entre una gran cantidad de personas, las cuales son expertas en diferentes facetas del problema. Un índice de esta naturaleza debe tratar de capturar el conocimiento colectivo de todos los

expertos para definir su valor, concebido por un grupo como un todo. La ponderación es correcta siempre que cumpla con esa meta.

Una variedad de técnicas de ponderación han sido usadas para la construcción de otros índices compuestos, sin embargo todos aquellos propuestos con base en técnicas estadísticas requieren, o que las variables dependientes puedan ser medidas directamente (por ejemplo, regresión), o que los indicadores estén bien correlacionados (por ejemplo, análisis de componentes principales). Dado que el riesgo no puede ser medido directamente y los indicadores no están bien correlacionados, cualquiera de las técnicas con esos requisitos es inapropiada para evaluar la vulnerabilidad o el riesgo. La única opción que queda para la ponderación es la evaluación subjetiva por parte de expertos. Aunque esta técnica parece ser indeseable por algunos, por la falta de una base explicitamente replicable, es la única opción factible y razonable para capturar el criterio, la experiencia y el juicio de expertos (Davidson, 1997) [Ref.10.5]. En el caso del presente estudio se solicitó a expertos del CEDERI y del INVIAST proponer el peso de cada uno de los indicadores de acuerdo con su criterio y experiencia.

La Figura 6.1 muestra el peso asignado a cada uno de los indicadores involucrados en el análisis que se realiza.