

Universidad de Costa Rica

**Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos
Estructurales
LanammeUCR**

Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional

**Evaluación de la vulnerabilidad de obras de
drenaje intermedias, Ruta Nacional 1,
tramo Barranca – Liberia**

Noviembre, 2009

*Ing. Diego A. Cordero Carballo
Tec. Jairo Sanabria Sandino
Ing. José F. Garro Mora
Ing. William Vargas Monge, Ph.D.
Ing. Roy Barrantes Jiménez (coordinador)*

11 8 2009



Noviembre, 2009

Tabla de contenidos

	Página
1. Potestades	3
2. Objetivo de la evaluación	3
3. Alcance de la evaluación	3
4. Equipo evaluador	4
5. Introducción	5
6. Conceptos de evaluación y gestión de los riesgos naturales	8
7. Ruta Nacional 1	10
7.1. Descripción general de la Ruta Nacional 1	10
7.2. Información climatológica de la Ruta Nacional 1	10
8. Tramo evaluado Barranca-Liberia	12
8.1. Geología del tramo evaluado	12
8.2. Tipos de suelo	13
8.3. Uso de suelo	16
9. Metodologías de evaluación del riesgo en la infraestructura	20
9.1. Vulnerabilidad de pasos de agua y alcantarillas	20
9.2. Evaluación de caudales máximos	22
9.3. Estimación preliminar del tamaño de obras de drenaje intermedias	24
10. Vulnerabilidad ante caudales extremos del tramo Barranca-Liberia	26
10.1. Metodología de evaluación utilizada en este estudio	26
10.2. Vulnerabilidad de pasos de agua y alcantarillas	28
10.3. Puntos críticos	30
10.4. Estimación preliminar del tamaño de obras de drenaje intermedias	38
11. Conclusiones	41
12. Recomendaciones	43
13. Referencias bibliográficas	45
14. Anexos	47



Noviembre, 2009

1. Potestades

La ejecución de las evaluaciones técnicas realizadas de los distintos parámetros de la Red Vial Nacional, se fundamentan en las disposiciones que establece el Artículo 6 de la Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributarias, dentro del Programa de Infraestructura del Transporte y la Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

De esta forma se responde al mandato expreso de la ley de realizar “*Evaluación bienal de toda la Red Vial Nacional pavimentada*” y de informar “*para lo que en derecho corresponda, a la Asamblea Legislativa, al Ministerio de la Presidencia, al MOPT, a la Contraloría General de la República y a la Defensoría de los Habitantes, el resultado final de las auditorías técnicas realizadas a proyectos en ejecución y de las evaluaciones efectuadas a la red nacional pavimentada, las carreteras y los puentes en concesión*”.

2. Objetivo de la evaluación

El objetivo de estas evaluaciones es identificar factores de riesgo y vulnerabilidad ante eventos naturales de los distintos elementos de la infraestructura vial, mediante metodologías técnicas, objetivas y oportunas, de manera que se aporten elementos que promuevan un proceso de planificación, acciones preventivas o correctivas por parte de la Administración activa del Estado costarricense.

En este caso particular se evaluó la vulnerabilidad de obras de drenaje intermedias ante caudales extremos en el tramo Barranca-Liberia de la Ruta Nacional 1 en una longitud de 121 kilómetros, con el fin de diagnosticar su condición actual y proponer medidas para contribuir a la reducción de la vulnerabilidad existente.

3. Alcance de la evaluación

Dentro de las metodologías aplicadas por la Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional, se desarrollan análisis de vulnerabilidad de la infraestructura que abarcan parámetros como vulnerabilidad de los sistemas de drenaje (pasos de agua, alcantarillas y puentes), vulnerabilidad de puentes ante amenaza sísmica y la susceptibilidad a deslizamientos y a flujos de lodos y detritos. En este caso específico, se analizó el tramo Barranca – Liberia únicamente en cuanto a la vulnerabilidad de los drenajes intermedios (i.e., pasos de agua y alcantarillas), ya que los estudios preliminares determinaron que por ser zona de planicie la amenaza más significativa corresponde a la amenaza de caudales extremos. En informes posteriores se ampliará para incluir el análisis de otros de los parámetros mencionados.



Noviembre, 2009

4. Equipo evaluador

El equipo evaluador estuvo conformado por:

Ing. Roy Barrantes Jiménez

Ing. William Vargas Monge Ph.D.

Ing. Diego A. Cordero Carballo

Coordinador de la Unidad de Evaluación de la
Red Vial Nacional

Asesor técnico

Ingeniero Evaluador

Apoyo técnico

Ing. José Francisco Garro Mora

Tec. Jairo Sanabria Sandino

Ingeniero Evaluador

Asistente

Control de legalidad

Lic. Miguel Chacón Alvarado

Asesor legal externo



Noviembre, 2009

5. Introducción

Costa Rica cuenta con una gran diversidad geomorfológica producto de su gran dinamismo hidrometeorológico, tectónico y volcánico, dando como resultado una gran variedad de paisajes naturales. Estos elementos deben considerarse en el desarrollo de la infraestructura del país, con la meta de reducir al máximo su riesgo ante amenazas naturales y el impacto que estos podrían generar sobre el medio ambiente.

Las rutas nacionales, como la analizada en este trabajo, son de gran importancia estratégica para el país desde un punto de vista económico y social, siendo estas rutas las principales vías para la exportación e importación de bienes, para el transporte de personas y mercancías y para el acceso a las principales ciudades del país.

En los últimos 30 años, el país ha presentado importantes daños en su infraestructura vial debido a eventos naturales, como son las lluvias, huracanes (e.g., Juana, 1988; César, 1996; Mitch, 1998; Alma, 2008) y eventos sísmicos importantes (e.g., Pérez Zeledón, 1983; Limón, 1991; Cinchona, 2009).

La evaluación de las zonas susceptibles a daños en la infraestructura por causas naturales o antropológicas debe ser de gran importancia para los encargados de tomar decisiones a nivel técnico y político, especialmente a la hora de asignar recursos públicos para realizar reparaciones o rehabilitaciones de infraestructura que presente algún nivel de daño.

Las rutas nacionales pueden ser clasificadas por su topografía en rutas de montaña o rutas de llanura/planicie, clasificación que permite relacionar a cada una las amenazas geológicas más comunes en nuestro país, siendo éstas los deslizamientos para las rutas de montaña y las inundaciones para las rutas de llanura/planicie. En ambos casos hay otros aspectos geotécnicos de los materiales localizados a lo largo de las rutas que de igual manera se deben tomar en cuenta, como son suelos expansivos o con insuficiente capacidad de soporte.

En el presente estudio se analizó la vulnerabilidad de obras de drenaje intermedias del tramo Barranca-Liberia de la Ruta Nacional 1. El tramo analizado, con una longitud de 121 kilómetros y cuya valoración fue realizada por investigadores del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), se clasifica como ruta de planicie/llanura.

La ubicación geográfica del tramo analizado se muestra en las Figuras 1 y 2.



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

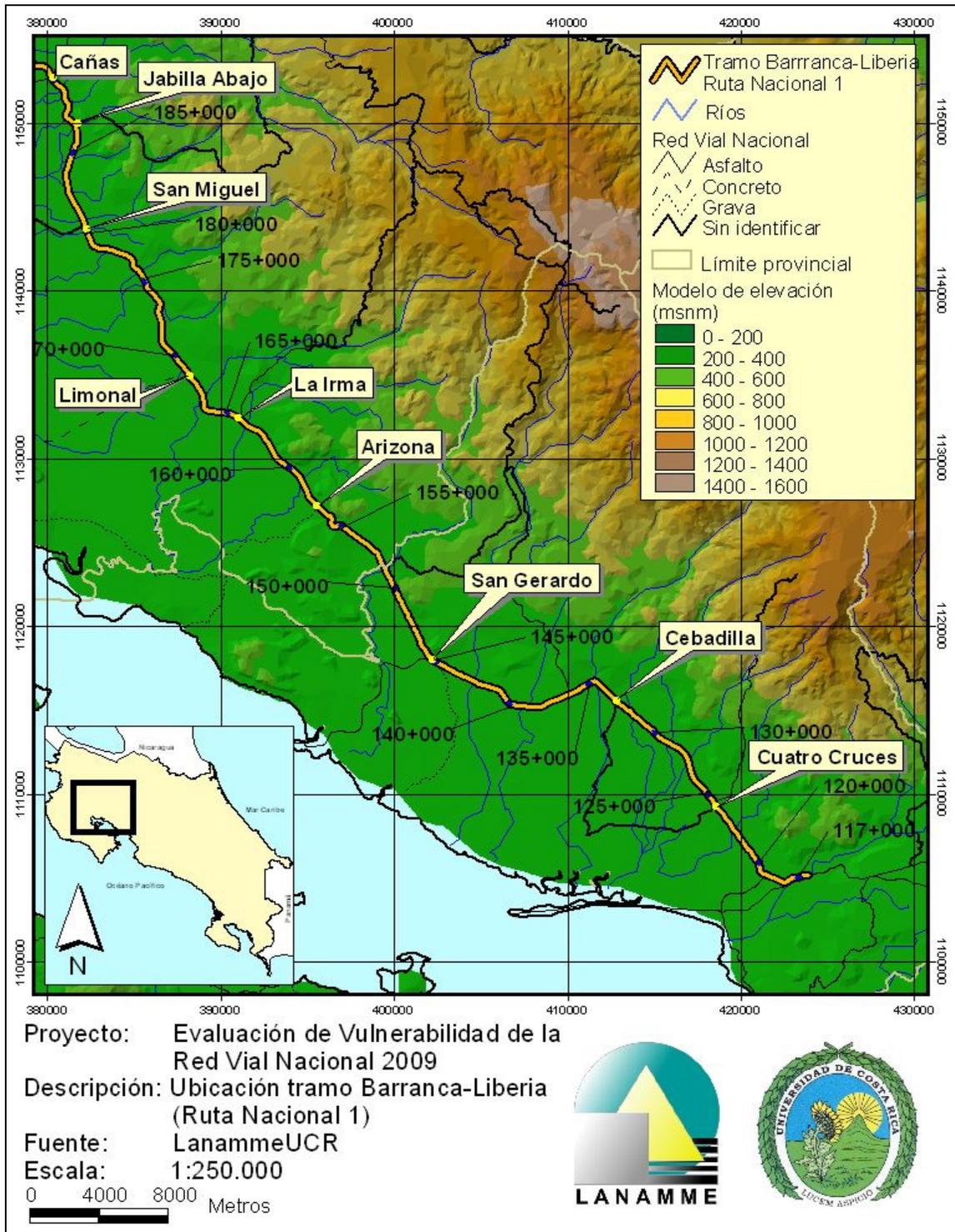


Figura 1. Tramo analizado de Ruta Nacional 1, Est. 117+000 a 185+000. (LanammeUCR, 2009).



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

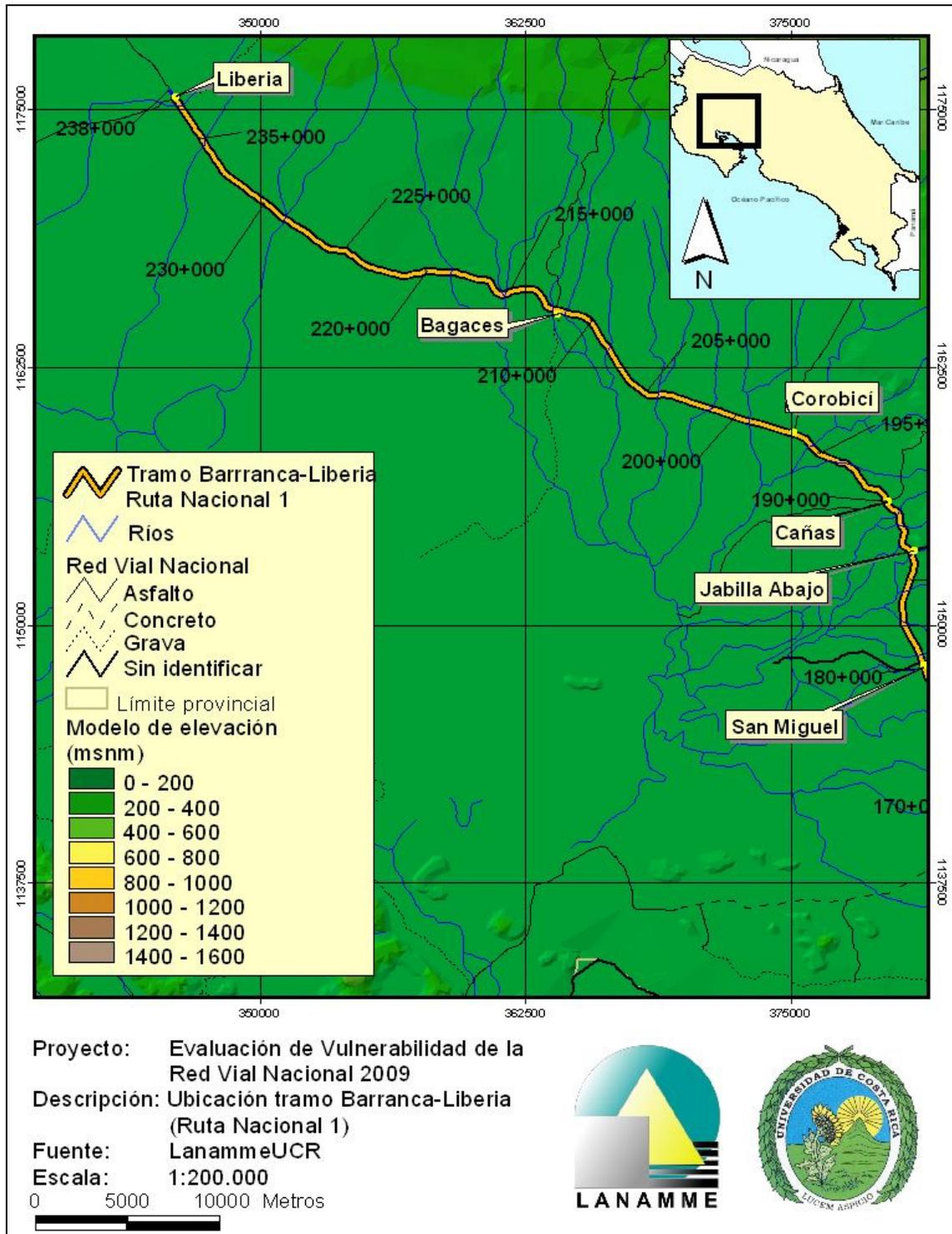


Figura 2. Tramo analizado de Ruta Nacional 1, Est. 180+000 a 238+000.
 (LanammeUCR, 2009).



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

6. Conceptos de evaluación y gestión de los riesgos naturales

La gestión de riesgo, según la define ITGD (2002), es la capacidad de una sociedad y sus actores sociales para transformar el riesgo, actuando sobre las causas que lo producen, mediante un proceso planificado, concertado, participativo e integral. Esta gestión debe considerar las medidas y formas de intervención que tiendan a reducir, mitigar o prevenir los desastres naturales, abarcando el manejo de los desastres a nivel regional o de país, ligado a la búsqueda de la sostenibilidad.

El riesgo se puede definir en función de dos factores: la amenaza y la vulnerabilidad, para lo cual es conveniente definir estos términos. La amenaza está relacionada con el factor natural. Se define como la posibilidad de la ocurrencia de un evento físico que pueda causar algún tipo de daño a la sociedad (ITDG, 2002). La amenaza se caracteriza en función de la susceptibilidad del sitio, la severidad (intensidad y duración) y la frecuencia del evento (LanammeUCR, 2003). La vulnerabilidad, por su parte, está relacionada con un factor humano. Se puede definir como el grado de pérdida de un elemento dado o de un conjunto de elementos en riesgo como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una determinada magnitud o severidad (UNESCO, 1984).

De acuerdo a los ingenieros William Vargas y José Garro (2003)¹, las amenazas más importantes para la infraestructura vial de Costa Rica, son las inundaciones y ondas de agua (caudales extremos), los deslizamientos de tierra y las vibraciones sísmicas. En un segundo nivel de importancia se pueden mencionar los flujos de lodos, los lahares, la licuación de suelos y la socavación. En un tercer nivel, se pueden nombrar los vientos fuertes, la ruptura superficial de fallas geológicas, los tsunamis y otras amenazas asociadas a la actividad volcánica.

Dentro de la infraestructura vial en nuestro entorno, los terraplenes de relleno, los taludes de corte y los puentes han demostrado ser las estructuras más vulnerables, seguidos por los sistemas de drenaje.

En un análisis de vulnerabilidad, ésta queda definida como el valor máximo alcanzado de vulnerabilidad para la totalidad de amenazas analizadas en cada tramo, por ende, en un tramo destacado con vulnerabilidad alta, ésta debe estar vinculada al menos con una amenaza.

El riesgo total o final se puede cuantificar en términos económicos; para lo cual se puede considerar el riesgo total como la suma de todos los riesgos específicos, que a su vez son función del tiempo y el espacio. Este valor económico conlleva una probabilidad intrínseca por lo que usualmente se proponen escenarios según sea su probabilidad. Estos escenarios en ocasiones no solo señalan los daños directos sobre la estructura, sino que también presentan daños indirectos asociados. La definición de estos escenarios queda fuera del alcance de este estudio y constituye el siguiente paso luego de realizar análisis preliminares como el que se presenta a continuación.

¹ Vargas, W. & Garro, J. (2003). *Gestión de riesgos naturales en infraestructura vial*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.



LanammeUCR

LM-PI-PV-ERV-02-09

Noviembre, 2009

La gestión del riesgo consiste en la implementación sistemática de medidas para la reducción de la vulnerabilidad. La mayoría de las amenazas naturales no están sujetas a un posible control humano o tecnológico, por lo que la reducción de la vulnerabilidad es la mejor, y en algunos casos la única forma, de reducir el riesgo. Medidas de la gestión del riesgo engloban aspectos como la evaluación, prevención, mitigación, preparación y respuesta ante dicho riesgo.

En el LanammeUCR, se desarrollan estas evaluaciones por medio de la Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional y con fundamento en la Ley No. 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributarias, en la evaluación de los riesgos naturales de la infraestructura vial. La investigación ha abarcado tanto la evaluación de amenazas como la de los componentes estructurales más importantes de la infraestructura vial nacional, como son los puentes, taludes de corte, terraplenes y alcantarillas. Como resultado de este trabajo se han adaptado y desarrollado metodologías de evaluación necesarias para la identificación, cuantificación y priorización del riesgo, convirtiéndolas en herramientas útiles para los encargados de la toma de decisiones.



Noviembre, 2009

7. Ruta Nacional 1

7.1. Descripción general de la Ruta Nacional 1

La Ruta Nacional 1 inicia en el Parque de la Merced en San José. Desde La Sabana y hasta el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría recibe el nombre de Autopista General Cañas, luego de este punto y hasta San Ramón de Alajuela recibe el nombre de Autopista Bernardo Soto. Posteriormente pasa por Esparza, la intersección a Puntarenas y se dirige a la Costanera, llegando a la zona de planicie de Guanacaste (pasando por Cañas, Bagaces y Liberia) y termina su recorrido en Peñas Blancas, en la frontera norte de nuestro país, recorriendo en total una distancia de 285 kilómetros.

7.2. Información climatológica de la Ruta Nacional 1

La Ruta Nacional 1 recorre zonas bastante secas (Orozco, 2007), condición predominante entre Esparza y Peñas Blancas, sector en la cual se encuentran puntos con las menores precipitaciones anuales y las temperaturas más altas del país, con un promedio anual de 32 °C en Liberia.

En general, la Ruta Nacional 1 es de clima seco, registrando al menos 5 meses del año sin precipitaciones, régimen típico del Valle Central, de las regiones del Golfo de Nicoya y la Llanura Guanacasteca. No obstante, en la parte más al norte, en las zonas cercanas a Liberia, registra las mayores intensidades de lluvia (Orozco, 2007).

Las Tablas 1 y 2 muestran información climatológica de Puntarenas y Liberia, ambas importantes ciudades que conecta la Ruta Nacional 1.



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

Tabla 1. Información climatológica de Puntarenas.²
(Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2009).

Mes	Temperatura media °C		Precipitación total media (mm)	Promedio de días con lluvia
	Mínima	Máxima		
Enero	20,2	33,5	9,6	3
Febrero	21,8	34,4	2,0	2
Marzo	22,3	34,7	3,1	1
Abril	23,3	35,1	26,1	2
Mayo	23,2	33,3	198,9	14
Junio	22,9	31,2	171,7	17
Julio	22,4	32,2	78,3	16
Agosto	22,3	31,9	150,4	17
Septiembre	22,4	31,6	269,8	22
Octubre	21,9	31,3	251,6	20
Noviembre	21,7	32,3	71,4	13
Diciembre	21,7	32,2	26,5	5

Tabla 2. Información climatológica de Liberia.³
(Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2009).

Mes	Temperatura media °C		Precipitación total media (mm)	Promedio de días con lluvia
	Mínima	Máxima		
Enero	20,6	33,4	1,2	1
Febrero	21,1	34,4	1,8	0
Marzo	21,7	35,4	5,2	0
Abril	22,8	36,0	17,5	3
Mayo	23,5	34,0	198,3	15
Junio	23,2	32,1	244,8	23
Julio	22,8	32,2	147,2	18
Agosto	22,6	32,1	205,8	19
Septiembre	22,3	31,2	366,1	28
Octubre	22,2	31,1	317,5	25
Noviembre	21,6	31,7	103,1	12
Diciembre	21,1	32,6	11,3	4

² Estación: 3, Puntarenas, Puntarenas. Ubicación 09°58 N, 84°50 O, 3 m.

³ Estación: 20, Aeropuerto Daniel Oduber, Liberia. Ubicación 10°35 N, 85°32 O, 80 m.



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

8. Tramo evaluado Barranca-Liberia

El tramo analizado de la Ruta Nacional 1 parte de la ciudad de Barranca, provincia de Puntarenas, atravesando las poblaciones de Cuatro Cruces, Cebadilla, San Gerardo, Arizona, La Irma, Limonar, San Miguel, Jabilla Abajo, Cañas, Corobicí y Bagaces, finalizando en la ciudad de Liberia, cantón central de la provincia de Guanacaste.

El tramo en estudio está construido en su totalidad en pavimento asfáltico, en dos carriles con un ancho promedio de calzada de 7,75 metros en una longitud de 121 kilómetros.

8.1. Geología del tramo evaluado

La información geológica de la zona donde se ubica el tramo evaluado fue obtenida a partir del “Mapa geológico de Costa Rica” (Fernández et al., 1997) y del libro “Geología de Costa Rica” (Denyer & Kussmaul, 2000). (Ver Figura 3).

Se presenta a continuación la descripción de las formaciones que atraviesa el tramo analizado:

- 1. Formación Aluvial cuaterna:** Esta formación consiste de depósitos aluviales, coluviales y sistemas costeros.
- 2. Formación Bagaces:** Consiste de tobas dacíticas, principalmente ignimbritas y sedimentos lacustres asociados.
- 3. Formación Descartes:** Consiste de unos 1500 metros de alternancias cíclicas de areniscas, conglomerados y brechas, de composición volcániclastica y carbonatada, depositadas durante el Paleoceno Superior-Eoceno Superior/Oligoceno Inferior. Tienen una amplia distribución geográfica, que comprende desde fila Pájaros, la isla San Lucas, el sureste de la península de Nicoya hasta la península de Santa Elena, bahía Bolaños y el suroeste de Nicaragua. Está expuesta típicamente en punta Descartes, al norte de la península de Santa Elena, en el área de Manzanillo y en las islas y acantilados al noreste del golfo de Nicoya.
- 4. Formación Esparza:** Se compone de clastos centimétricos, angulosos a subredondeados, con un máximo de 50 centímetros, compuestos por lavas andesíticas porfiríticas con megacristales de plagioclasa, o bien con gran cantidad de piroxenos, lavas vesiculares, cuarzo lechoso y tobas. Algunos de los clastos presentan alteración hidrotermal. Los clastos representan un 30% del total de la roca. Los clastos flotan en una matriz arcillosa (70%) café rojiza. El espesor de esta formación puede alcanzar los 50 metros, aunque puede ser tan delgada como 1 o 2 metros.



Noviembre, 2009

5. **Formación Grupo Aguacate:** Esta formación está constituida por basaltos ricos en potasio y andesitas basálticas que afloran en los Montes del Aguacate (coladas, diques o rocas piroclásticas gruesas). Similares en edad y petrografía a rocas volcánicas de la Cordillera de Salamanca y la Fila Costeña.
6. **Formación Liberia:** Esta formación consiste de ignimbritas formadas por la acumulación de cenizas pumíceas de diferentes tamaños poco aglutinadas.
7. **Formación Punta Carballo:** Esta formación está constituida por los siguientes tipos de roca: areniscas y lutitas verdes, bien estratificadas en capas de 10 a 20 centímetros de espesor, estratos conglomerados de unos 2 metros de espesor y de toba de 1 a 2 metros de espesor; existen también estratos aislados de caliza. La parte superior se caracteriza por la presencia de brechas, areniscas verdosas, lutitas rojizas y conglomerados, con troncos fósiles gruesos (mayores de 0,5 metros) a menudo silicificados.

8.2. Tipos de suelo

De acuerdo con los ingenieros Roy Bogantes, Gastón Laporte, Carlos Quesada y Alexis Vásquez (2002)⁴ el tramo analizado atraviesa los siguientes tipos de suelos (Ver Figura 4):

1. **Suelos residuales de color amarillento (Am):** Son suelos del orden de los entisoles, tiene un proceso de formación similar a los suelos rojizos; sin embargo, estos suelos pardo-amarillentos se caracterizan por estar permanente húmedos durante todo el año, lo cual les confiere dicho color pardo amarillento, en vez del color rojizo de los suelos con ciclos de humedecimiento y secado bien definidos. Estos suelos tienen menos contenido de arcilla que los suelos lateríticos, y pueden ser pedregosos, sobre todo en zonas de relieve ondulado. Mineralógicamente presentan una predominancia de caolinita.

Desde un punto de vista ingenieril sus características mecánicas tienden a mejorar con la profundidad. Su alto contenido de humedad durante todo el año los hace difíciles de compactar, tanto por su consistencia como por la dificultad, debido al clima, de secarlos al aire para alcanzar la humedad óptima. Son suelos en general blandos, aunque aptos para la cimentación de estructuras livianas. Estructuras pesadas probablemente requerirían de algún mejoramiento o sustitución de las capas más superficiales del suelo. Presentan una buena permeabilidad, mayor que la de los suelos rojizos.

2. **Suelos arcillosos de alto potencial de expansión (Arc):** Estos suelos están asociados con los *vertisoles* de la taxonomía de suelos. En el ámbito ingenieril se les conoce como *zonzocuitles* o *barro de olla*. Superficialmente presentan un

⁴ Bogantes, R., Laporte, G., Quesada, C. & Vásquez, A. (2002). *Zonificación geotécnica general de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos*. San José, Costa Rica.

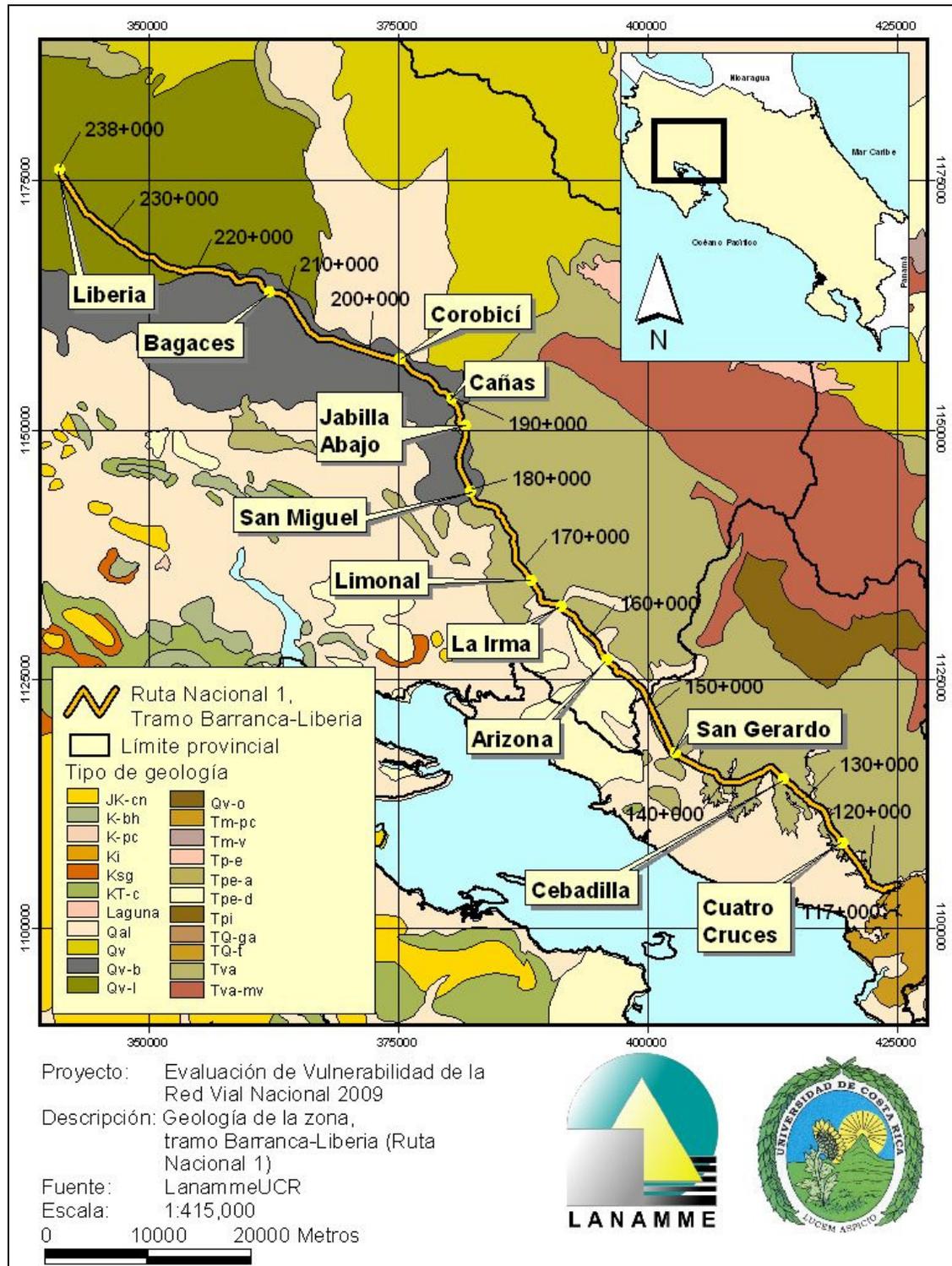


Figura 3. Geología de la zona. (LanammeUCR, 2009).



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

estrato de arcilla color negro de muy alto potencial de expansión, de al menos 60 cm de espesor usualmente subyacido por un estrato de arcilla gris, también con gran capacidad de expandirse. En ambos tipos de arcilla, el contenido de montmorillonita es lo suficientemente elevado como para darle al suelo una consistencia pegajosa cuando está húmedo (alta adherencia), y para agrietarlo cuando se seca durante el verano. Este tipo de suelo sólo puede presentarse en zonas con un clima de estacionalidad definida, ya que los ciclos de humedecimiento-secado-agrietamiento son básicos para su desarrollo, por lo que se encuentran en la Vertiente Pacífica y en algunas zonas de Valle Central de Costa Rica. Son suelos de topografías muy planas, lo que dificulta su drenaje y a la vez favorece su desarrollo.

Desde un punto de vista ingenieril son suelos sumamente permeables y el potencial de expansión de estas arcillas puede ocasionar problemas a cualquier obra liviana que se cimiente sobre ellos (e.g., pavimentos, bodegas, casas). Sin embargo, una vez eliminada la capa superficial de arcilla, usualmente el material subyacente es de muy buena capacidad soportante y sin características expansivas. Este material es la roca original y en el caso de Valle Central, estos suelos se desarrollan sobre rocas de tipo ignimbrítico. En la zona del Tempisque se desarrollan sobre materiales aluviales.

- 3. Suelos residuales rojizos (*Lat*):** Son suelos residuales rojizos, mal llamados *lateríticos* en el ámbito ingenieril, de gran desarrollo, lo que se traduce en un espesor de la capa de suelo (material con grado de alteración VI) con un espesor superior a los 2 metros. Se encuentran extendidos a lo largo y ancho del país, y pueden desarrollarse prácticamente a partir de cualquier roca madre y en cualquier clima. Los óxidos de hierro le confiere su coloración característica. Mineralógicamente predominan los minerales arcillosos caoliníticos, con la presencia ocasional de halloisita. Son arcillas limosas de alta plasticidad (generalmente MH), con límites líquidos superiores al 70%. Usualmente contienen más del 65% de arcilla caolinítica en su granulometría.

Desde un punto de vista ingenieril presentan buenas condiciones de cimentación para obras livianas como casas y carreteras. Su principal problema radica en su susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de taludes como reptación y deslizamientos superficiales. La propensión a la inestabilidad de estos suelos puede explicarse si se considera el perfil típico de un suelo residual, en la cual se observa que existe una superficie preferencial de falla entre los horizontes de suelo residual y roca meteorizada. Su permeabilidad es buena por su alto contenido de arcilla caolinítica. Son suelos difíciles de compactar por su alta humedad natural y óptima. Se han encontrado casos en los que su consistencia es muy blanda, principalmente en zonas lluviosas.

- 4. Suelos aluviales (*Lic*):** Estos suelos tienen su origen en la depositación de los materiales finos (limos y arcillas) arrastrados por los ríos, por lo que son típicos de las llanuras aluviales del país. Por ser suelos de tipo transportado, sus



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

características y estratigrafía son muy variables, tanto en planta como en profundidad. Por la topografía plana en la que se ubican, frecuentemente presentan un nivel freático superficial, lo que aunado a su bajo contenido de arcilla los hace susceptible a licuarse en caso de sismos fuertes.

Desde un punto de vista ingenieril por su origen transportado, son suelos en general blandos y por sus constituyentes no cohesivos (limos y arenas) son suelos permeables. Como en otros suelos transportados, es muy factible encontrar estratos blandos sub-yacientes.

- 5. Suelos de poco espesor (*Roc*):** Son suelos poco desarrollados por la existencia de un material resistente a poca profundidad, usualmente menos de 60 centímetros. El desarrollo de estos suelos se ve limitado por dos factores principales: en primer lugar, si el suelo se ubica en fuertes pendiente, los procesos de erosión superan los de formación del suelo y no pueden desarrollar espesores importantes; en este caso, el suelo presenta un color rojizo, signo de que la roca sub-yacente se encuentra muy meteorizada. En segundo lugar, en muchos aluviones se presentan gran cantidad de bloques resistentes a la meteorización, con lo que el suelo tampoco se puede desarrollar, aunque se ubique sobre topografía plana.

Desde un punto de vista ingenieril, en caso de ubicarse en zonas montañosas el suelo prácticamente no existe y se encuentra más bien roca alterada superficialmente. Dependiendo de la formación geológica y de las condiciones locales pueden presentarse deslizamientos en roca en algunas zonas. Al estar constituidos por roca alterada, el material es de muy baja permeabilidad, ya que las fracturas usualmente se encuentran rellenas de minerales arcillosos.

Si se ubican sobre aluviones en zonas planas, el suelo se caracteriza por la gran cantidad de bloques, lo que puede dificultar su excavación. Su permeabilidad es alta, ya que estos aluviones no están cementados y usualmente contienen cantidades apreciables de materiales limosos y arenosos, que le confieren una buena permeabilidad.

Estos suelos también pueden presentarse sobre ignimbritas masivas resistentes a la meteorización, como se observa en algunas zonas de Guanacaste. En este caso, la topografía puede ser plana y se presentan excelentes condiciones de cimentación, tanto de estructuras puntuales como en obras viales. Son suelos poco permeables por la presencia de la ignimbrita o toba masiva a poca profundidad.

8.3. Uso de suelo

El uso de suelo predominante en el tramo en estudio es el de pasto. En total, el tramo analizado atraviesa los siguientes usos de suelo: urbano, pasto, pasto con agricultura, cultivos permanentes, bosque secundario, bosque natural, charral y tacotal, bosque



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

natural intervenido, áreas quemadas y cultivos estacionales. El detalle de los usos de suelo de la zona se muestra en la Figura 5.

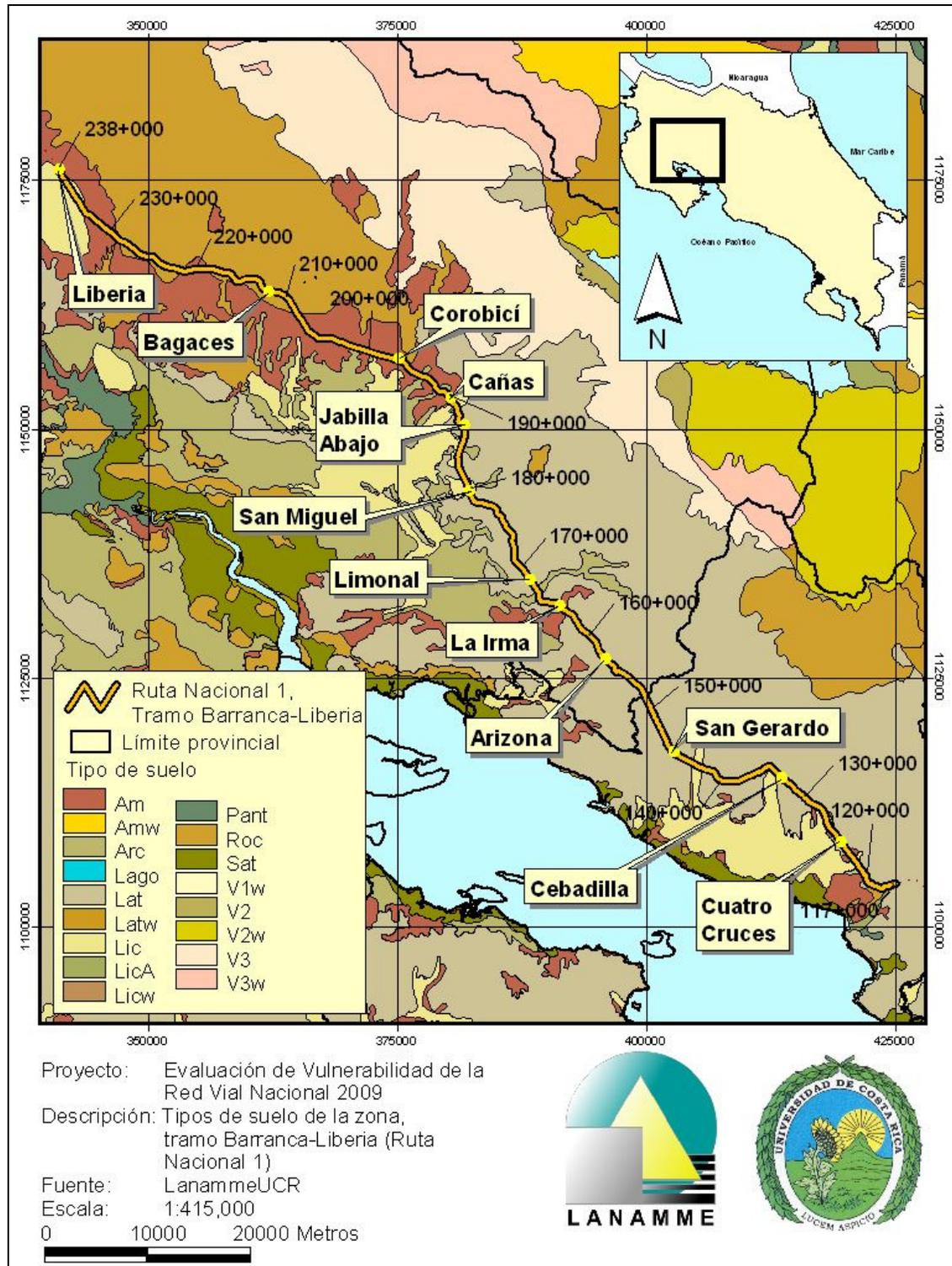


Figura 4. Tipos de suelo de la zona. (LanammeUCR, 2009).

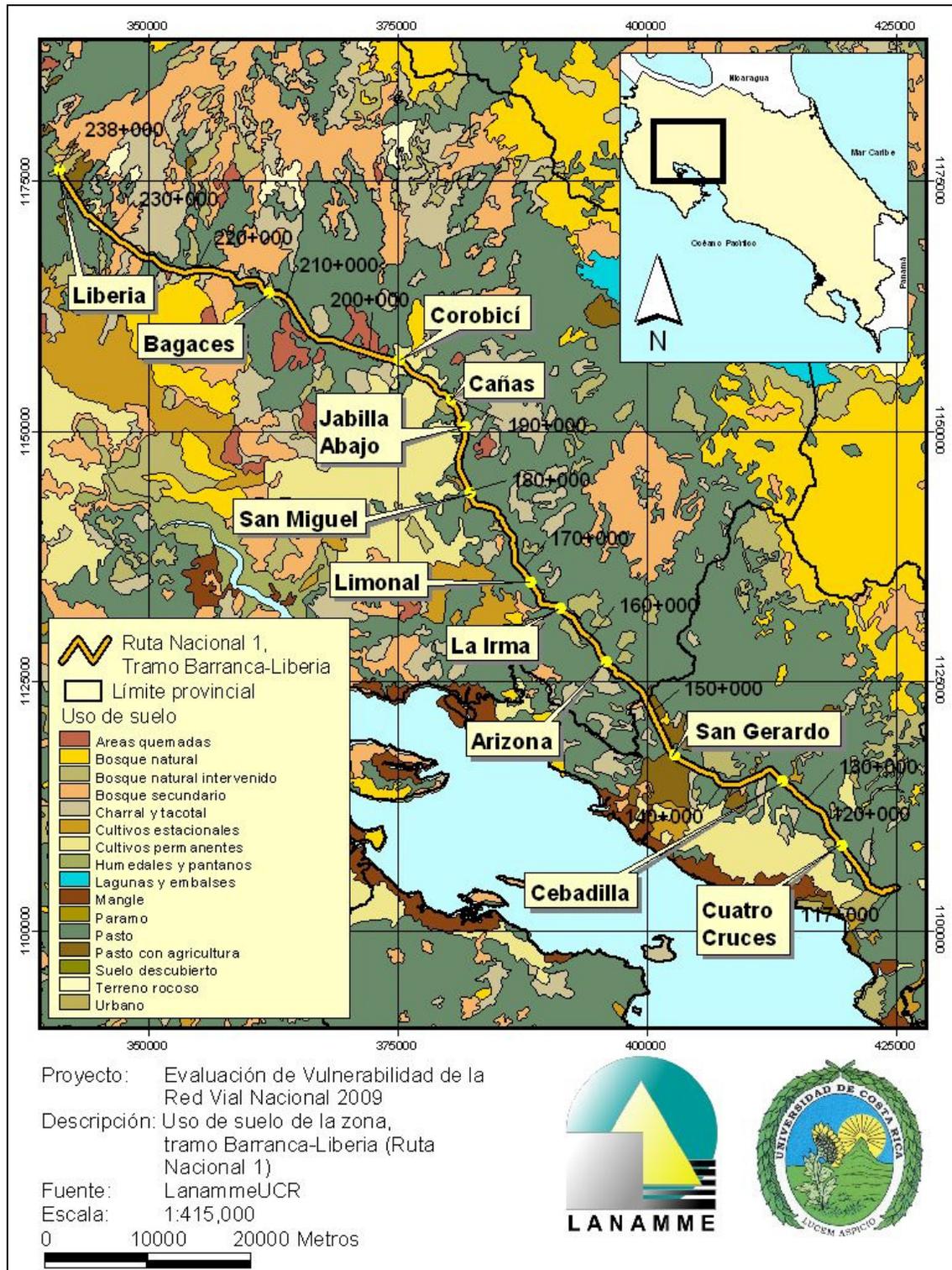


Figura 5. Uso de suelo de la zona. (LanammeUCR, 2009).



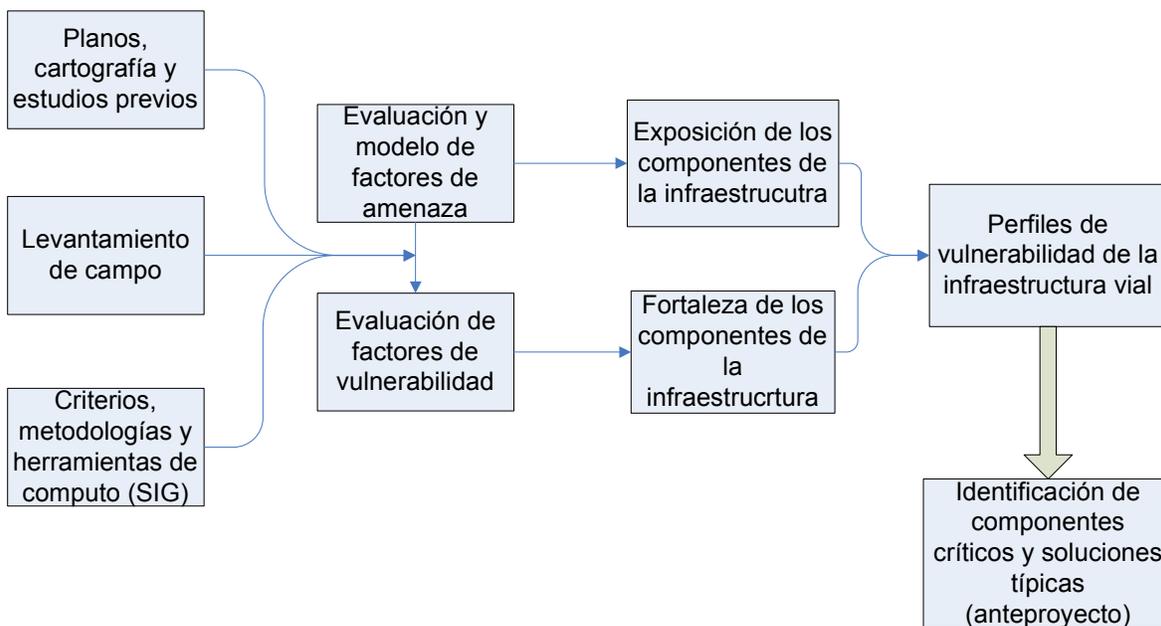
Noviembre, 2009

9. Metodologías de evaluación del riesgo en la infraestructura

La metodología empleada por el LanammeUCR para la evaluación de riesgos naturales de la infraestructura vial se presenta en el Esquema 1. Posterior a las etapas mostradas en dicho esquema, y fuera del alcance del presente trabajo, se encuentra un análisis económico (costo-beneficio) de las soluciones, la definición de las prioridades de inversión y la implementación de proyectos de reducción de la vulnerabilidad para diversos escenarios de riesgo.

En los siguientes apartados se discute el criterio para análisis de vulnerabilidad utilizado para realizar el presente trabajo, enfocado en la vulnerabilidad de obras de drenaje intermedias.

Esquema 1. Evaluación de riesgos naturales en la infraestructura vial.
(Vargas & Garro, 2003).



9.1. Vulnerabilidad de pasos de agua y alcantarillas

Los caudales extremos son la amenaza más importante para las obras de drenaje menor e intermedias (i.e., pasos de agua y alcantarillas). Las alcantarillas y pasos de agua usualmente tienen áreas de cuenca reducidas, para el caso de rutas de montaña las metodologías simplificadas han sido utilizadas en los estudios en cuencas de hasta 25 km², en tanto para rutas de llanura la cuenca máxima evaluada ha sido de 10 km². Usualmente, en cuencas mayores se encuentran puentes y su análisis, desde el punto de vista hidrometeorológico, queda fuera del alcance de este trabajo. La valoración de la vulnerabilidad de caudales extremos en puentes es importante principalmente en zonas



Noviembre, 2009

de llanura, por donde transitan ríos que presentan mayor amenaza que la de los ríos de montaña, principalmente por su área de cuenca y características topográficas.

Para evaluar los niveles de amenaza sobre las obras de drenaje intermedias se hace uso de la fórmula racional, la cual ha demostrado ser aplicable en cuencas pequeñas. Su formulación se presenta a continuación:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,62}$$

donde:

- C: coeficiente de escorrentía
- i: intensidad de la lluvia
- A: área de la cuenca

De estas variables, la intensidad de la lluvia se puede relacionar con un periodo de ocurrencia o retorno (frecuencia del evento); para este estudio se utilizan valores de caudales para 20 (Q_{20}) y 100 (Q_{100}) años de periodo de retorno para evaluar la amenaza.

La vulnerabilidad hidráulica de las obras de drenaje intermedias es función del área disponible para el flujo, dado que su velocidad, y por ende su capacidad, es función de esta variable. Velocidades altas conducen a la erosión de las obras hidráulicas y la socavación de terraplenes. Una insuficiente área de drenaje lleva a embalsar las aguas generando en los terraplenes empujes hidrodinámicos, saturación de suelos y flujo de agua a través de los mismos, aspectos que pueden llevar al deslizamiento, al lavado de finos (tubificación) y a la socavación de la estructura.

El desempeño hidráulico de una alcantarilla y paso de agua se relaciona con el caudal y la altura del flujo de entrada. La Figura 6 muestra una curva de desempeño típica de alcantarillas.

En la Figura 6 se identifican 4 zonas, en las dos primeras la alcantarilla funciona como canal abierto (operación normal y límite de operación normal), en la zona 3 ya se trabaja como una tubería a presión y ya en la cuarta zona el agua pasa sobre la vía.

Con base en las recomendaciones de Ernesto Rodríguez (1989)⁵ y los periodos de retorno mencionados anteriormente se elaboró el criterio de vulnerabilidad mostrado en la Tabla 3.

La configuración del conjunto de alcantarillas y pasos de agua es también un factor determinante para evacuar objetos arrastrados por caudales extremos o flujos de detritos tales como rocas, troncos, entre otros. Desde este punto de vista, no se recomienda dividir el área en dos o más conductos que faciliten su obstrucción.

⁵ Rodríguez, E. (1989). *Revisión de métodos de diseño hidrológico e hidráulico de alcantarillas para carreteras*. Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil.

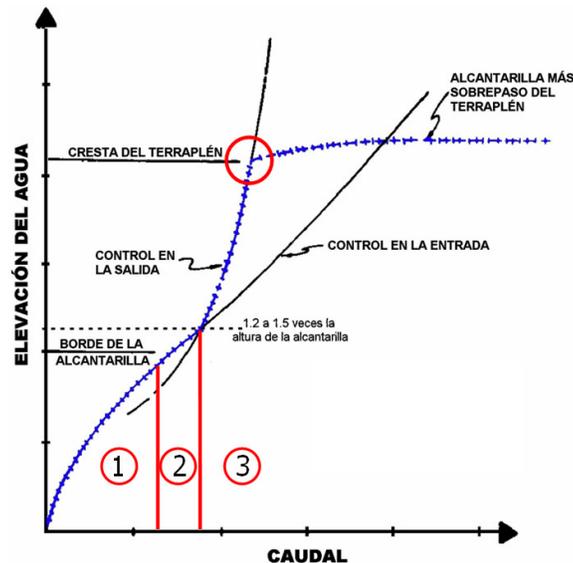


Figura 6. Curva de desempeño hidráulico de una alcantarilla.
(Vargas & Garro, 2008).

Tabla 3. Vulnerabilidad de obras de drenaje intermedias con base en las curvas de desempeño. (Vargas & Garro, 2008).

Vulnerabilidad	Zona de la curva (según Figura 2)		Color	Funcionamiento de la obra de drenaje intermedia
	Q ₂₀	Q ₁₀₀		
Muy baja	1	1	Azul	Alcantarilla sobredimensionada
Baja	1	2	Verde	Operacional en cualquier caso
Moderada	2	2	Amarillo	Sensible a cambios de cuenca
Alta	2	3	Naranja	Insuficiente para eventos extremos
Muy Alta	3 o 4	3 o 4	Rojo	Daños esperables en eventos moderados

9.2. Evaluación de caudales máximos

Para evaluar la vulnerabilidad de obras de drenaje intermedias por falta de capacidad hidráulica se puede emplear la metodología que se describe a continuación.

- i. Identificación de los pasos de aguas en el corredor analizado, mediante mapas impresos o visitas de campo.
- ii. Levantamiento en campo de las características básicas de las alcantarillas y pasos de agua
 - a. Tamaño de la sección transversal
 - b. Geometría de la sección



Noviembre, 2009

- c. Pendiente
 - d. Material
 - e. Ángulo del cabezal
 - f. Altura del relleno en la entrada
 - g. Profundidad del cauce en la salida
 - h. Estado actual
- iii. Delimitación de la cuenca para cada paso de agua en la ruta analizada, utilizando para ello un Sistema de Información Geográfica.
- iv. Para cada cuenca se obtiene el tiempo de concentración, definido por la siguiente ecuación (Kirpich):

$$t_c = 56,77 \cdot \frac{L^{1,155}}{h^{0,385}}$$

donde:

- t_c : tiempo de concentración, en minutos
- L: longitud del cauce más largo, en kilómetros
- h: diferencia de elevación entre las cotas de inicio y final del cauce más largo, en metros

- v. Calculo de la intensidad de lluvia para cada cuenca de acuerdo con sus características.
- a. Se obtiene el valor de lluvia máxima con una duración de una hora para un periodo de retorno de una hora para cada cuenca a partir del mapa del Servicio Meteorológico Nacional de Costa Rica de 1967, disponible en el trabajo “Revisión de métodos de diseño hidrológico e hidráulico de alcantarillas para carreteras” desarrollado por Ernesto Rodríguez (1989)⁶.
 - b. El valor de lluvia máxima con duración de una hora con periodo de retorno de una hora se debe convertir a un valor de lluvia máxima con duración de una hora para diferentes periodos de retorno. Para el caso de alcantarillas y pasos de agua se utilizan periodos de retorno de 20 años para diseño y 100 años para revisión.
 - c. Utilizando las Curvas Estándar de Intensidad-Duración se convierte de lluvia al valor de lluvia con duración igual al tiempo de concentración para cada cuenca.

⁶ Rodríguez, E. (1989). *Revisión de métodos de diseño hidrológico e hidráulico de alcantarillas para carreteras*. Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil.



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

- vi. Se calcula para cada cuenca el valor del coeficiente de escorrentía C promedio, a partir del uso de suelo que presente cada una.
- vii. Utilizando la Formula Racional, descrita en el apartado anterior, se calcula el caudal en cada cuenca.
- viii. Se realiza la comparación entre el caudal obtenido en el punto anterior con el caudal máximo teórico para cada alcantarilla y/o paso de agua, este se obtiene de los nomogramas del Federal Highway Administration de Estados Unidos, según las características geométricas de cada alcantarilla.
- ix. Se asigna la vulnerabilidad a cada alcantarilla y paso de agua. Se propone utilizar el criterio de los ingenieros William Vargas y José Garro (2008)⁷ descrito en el apartado anterior.

9.3. Estimación preliminar del tamaño de obras de drenaje intermedias

Para el cálculo del área hidráulica necesaria de una obra de drenaje se pueden utilizar diferentes métodos, como el Método Racional discutido en secciones anteriores. Para hacer una estimación preliminar del tamaño de obras de drenaje intermedias, como son las alcantarillas y pasos de agua, se puede usar la Fórmula de Talbot.

La Fórmula de Talbot se basa en observaciones en zonas de alta precipitación pluvial en el medio oeste de Estados Unidos (100 mm/ha) y está definida por la siguiente ecuación:

$$a = 0,183 \cdot C \cdot A^{3/4}$$

donde:

a: área hidráulica necesaria en la obra (m²)

A: área de la cuenca (ha)

C: coeficiente que varía de acuerdo a las características del terreno. C=0,2 para terrenos llanos, C=0,4 para terreno poco ondulado, C= 0,5 para terreno muy ondulado, C=0,6 para terreno con pocas lomas, C=0,8 para terreno con muchas lomas, C=1,0 para terreno montañoso y escarpado (Rodríguez, 1989).

⁷ Vargas, W. & Garro, J. (2008). *Relación entre las características geométricas y la vulnerabilidad de algunas rutas de montaña de Costa Rica*. Costa Rica: I Congreso Ibero-Americano de Seguridad Vial (I CISEV).



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

Para el uso del Método de Talbot se debe seguir la siguiente metodología:

- i. Definir el área de la cuenca. Delimitación de la participación de aguas que llegan a la cuenca a medir. El área hidráulica de la cuenca se puede obtener por diferentes métodos topográficos o por medio de fotografías aéreas.
- ii. Medir el área de la cuenca. La medición para el cálculo de la cuenca puede ser aproximado por medio de mapas topográficos. Si se contara con instrumentos de medición tales como planímetros o curvímetros se podrá mejorar la precisión del cálculo, requiriendo para ello conocer de antemano la escala del mapa y cualquier otra información necesaria.
- iii. Determinar el valor del coeficiente "C". Para ello se debe conocer la vegetación que cubre la cuenca (e.g., cultivado, bosque, suelo desnudo, pasto) y establecer la forma (e.g., montañoso, ondulado, plano) y pendiente del terreno.
- iv. Calcular el área hidráulica requerida por medio de la Fórmula de Talbot.



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

10. Vulnerabilidad ante caudales extremos del tramo Barranca-Liberia

La evaluación de vulnerabilidades en un corredor genera gran cantidad de información que se puede presentar de varias maneras o formatos, utilizando para ello Sistemas de Información Geográficos.

La salida más empleada en los estudios realizados son los mapas temáticos, en los cuales se reúnen varios elementos tales como el modelo de elevación digital y la vulnerabilidad/susceptibilidad a distintas amenazas

El presente apartado presenta una descripción de la metodología de evaluación utilizada en este estudio así como los resultados de la aplicación de las diferentes metodologías descritas en el apartado 5.

10.1. Metodología de evaluación utilizada en este estudio

Para el desarrollo de este estudio, el 11 de junio de 2009 técnicos e ingenieros del LanammeUCR realizaron recorridos en el tramo analizado para recoger información sobre las alcantarillas.

En dichos recorridos se recopiló información de las alcantarillas y pasos de agua, tal como su ubicación geográfica, datos geométricos (e.g., diámetro), tipo de estructura (e.g., alcantarillas de cajón, alcantarillas de caños ovalados) y estado de la misma (e.g., limpia, obstruida).

La información recolectada se complementó con información bibliográfica disponible para la zona, para posteriormente ser procesada por medio del Sistema de Información Geográfica ArcView, utilizando para ello las metodologías descritas en el apartado 9.

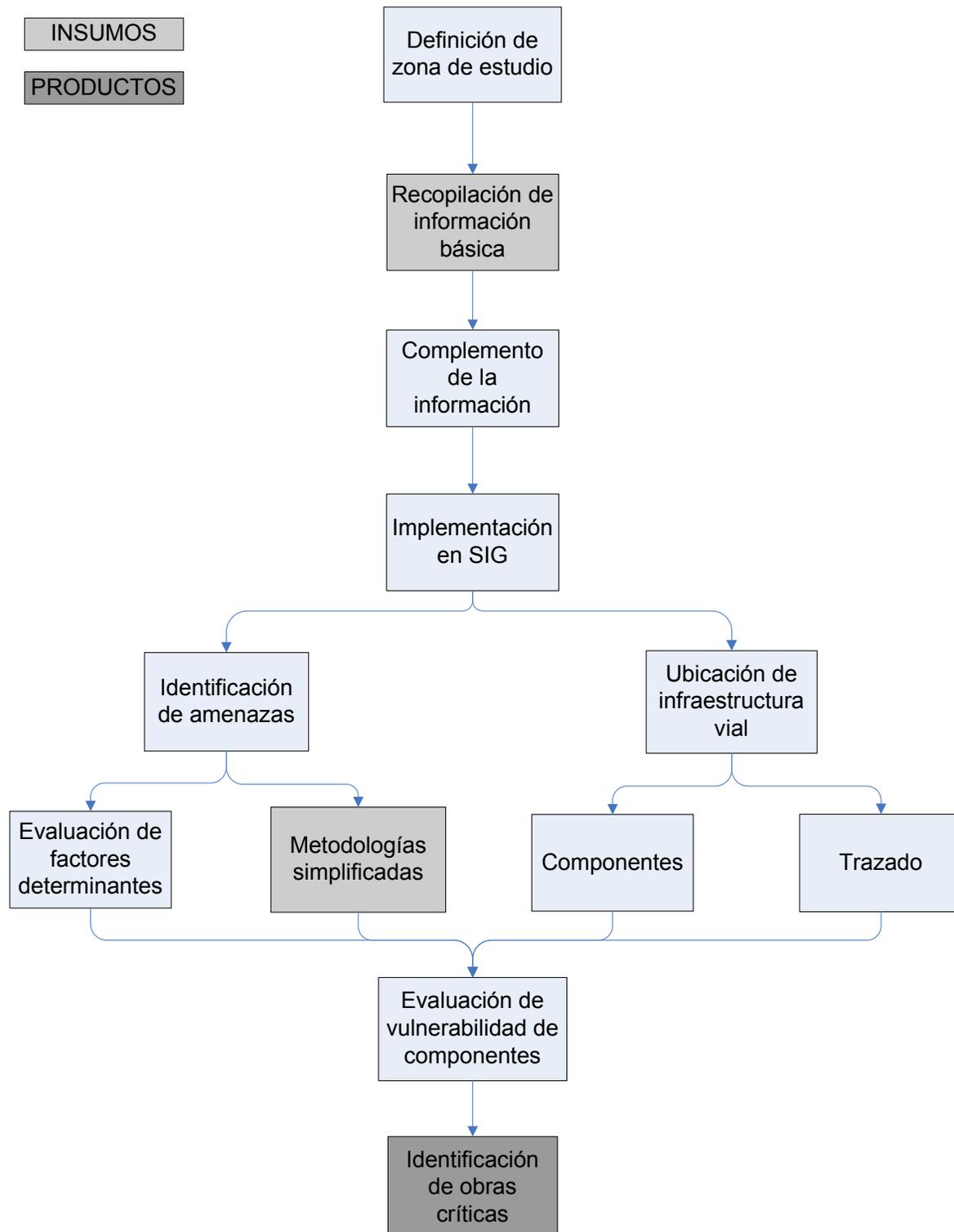
Como resultado final se obtuvo la vulnerabilidad de pasos de agua y alcantarillas ante caudales extremos. En los apartados siguientes se muestra el procesamiento de los datos realizado para la asignación de la vulnerabilidad a cada estructura de drenaje.

El esquema 2 presenta la metodología de trabajo utilizada.



Noviembre, 2009

Esquema 2. Metodología utilizada en el estudio.





Noviembre, 2009

10.2. Vulnerabilidad de pasos de agua y alcantarillas

Este tramo es cruzado por 71 estructuras de drenaje, de los cuales 37 corresponden a alcantarillas y pasos de agua y el resto a puentes. En total se evaluaron 35 alcantarillas y pasos de agua (Ver Tabla 4), debido al difícil acceso a las restantes obras de drenaje.

Para el análisis de vulnerabilidad de las obras de drenaje intermedias se siguió la metodología explicada en el apartado 9.2., la cual se utiliza para calcular el valor de caudal máximo para cada cuenca.

Tabla 4. Características de cada cuenca.

Cuenca	Nombre de río/quebrada	Área (km ²)	Longitud principal de cauce (m)	Elevación mayor (msnm)	Elevación menor (msnm)	Δh (m)	t _c ⁸ (min)
2	Quebrada SN ⁹	0,49	1013	164,7	40,0	124,7	8,99
3	Quebrada SN	0,11	711	140,0	52,5	87,5	6,84
4	Quebrada SN	0,23	674	100,0	46,6	53,4	7,78
6	Quebrada SN	0,21	781	80,0	19,5	60,5	8,79
7	Quebrada La Palma	1,96	2819	228,7	15,1	213,6	23,83
9	Río San Miguel	7,19	7069	380,0	11,6	368,4	55,86
11	Quebrada SN	0,46	1528	100,0	40,0	60,0	19,15
12	Quebrada SN	0,11	644	80,0	47,3	32,7	8,92
13	Quebrada SN	0,49	1171	110,0	52,7	57,3	14,34
14	Quebrado Negros	2,45	3483	260,0	38,7	221,3	30,01
15	Quebrada SN	0,86	1859	220,0	40,0	180,0	15,73
16	Quebrada SN	1,45	2309	260,0	60,0	200,0	19,41
18	Quebrada SN	0,94	1996	180,0	60,0	120,0	19,97
20	Quebrada Llano	2,37	5366	200,0	60,0	140,0	58,97
21	Quebrada SN	0,96	1964	160,0	80,0	80,0	22,91
22	Quebrada Palo	9,76	8171	520,0	80,0	440,0	61,67
24	Quebrada Hueco	4,23	6136	220,0	40,0	180,0	62,50
26	Quebrada Chanchos	2,67	3845	180,0	37,4	142,6	39,84
28	Quebrada Piedra Blanca	3,47	4016	280,0	80,0	200,0	36,78
32	Quebrada SN	1,26	1966	160,0	71,4	88,6	22,05
34	Quebrada Estaca	3,51	3290	240,0	80,0	160,0	31,83
35	Quebrada Manzanares	0,99	1596	160,0	100,0	60,0	20,14
38	Quebrada Duquesa	3,99	4476	180,0	50,0	130,0	49,21
42	Quebrada Arenas	2,32	2601	320,0	60,0	260,0	20,13
44	Quebrada Cangrejal	6,88	7599	512,8	100,0	412,8	58,12
45	Quebrada SN	1,23	1939	163,5	80,0	83,5	22,20
51	Quebrada SN	2,18	2713	60,0	40,0	20,0	56,74

Tabla 4 (cont.). Características de cada cuenca.

⁸ t_c: tiempo de concentración

⁹ SN: Sin nombre



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

Cuenca	Nombre de río/quebrada	Área (km ²)	Longitud principal de cauce (m)	Elevación mayor (msnm)	Elevación menor (msnm)	Δh (m)	t _c (min)
54	Quebrada SN	1,38	1735	88,7	70,0	18,7	34,74
57	Quebrada SN	0,75	1923	100,0	73,1	26,9	34,01
59	Quebrada SN	1,28	1995	110,0	90,0	20,0	39,78
61	Quebrada Anonos	0,89	1763	160,0	114,5	45,5	25,13
62	Quebrada Tigras	1,79	2524	160,0	113,5	46,5	37,72
63	Quebrada Barro	2,76	3675	130,0	100,0	30,0	68,91
65	Quebrada SN	1,72	3389	160,0	111,6	48,4	52,50
67	Río Guayabal	4,01	7496	200,0	120,0	80,0	107,61

Para asignar el coeficiente de escorrentía a cada cuenca, se utilizaron diferentes valores de escorrentía, según el uso de suelo promedio de cada cuenca. La Tabla 5 muestra valores típicos de coeficiente de escorrentía para diferentes usos de suelo.

Tabla 5. Coeficiente de escorrentía para cada uso del suelo. (Castro, 2005).

Uso de suelo	Coeficiente de escorrentía
Área urbana	0,70
Cultivo anual-permanente	0,35
Pasto	0,30
Uso mixto	0,45
Charral-tacotal	0,25
Bosque	0,30
Terreno descubierto	0,50

El cálculo del caudal de cada cuenca (Ver Tabla 6) se realizó mediante la fórmula racional, para lo cual se hace uso del área de la cuenca, del coeficiente promedio de escorrentía y de valores de intensidad de lluvia para periodos de retorno de 20 y 100 años obtenidos a partir del mapa del Servicio Meteorológico Nacional de Costa Rica de 1967 (Rodríguez, 1989).

Tabla 6. Valores para el cálculo del valor de caudal (m³/s) para cada cuenca.

Cuenca	Área (km ²)	Coeficiente de escorrentía (c)	Intensidad de lluvia (mm/h)	
			Periodo de 20 años	Periodo de 100 años
2	0,49	0,30	110	140
3	0,11	0,30	110	140
4	0,23	0,30	110	140
6	0,21	0,30	110	140



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

Tabla 6 (cont.). Valores para el cálculo del valor de caudal (m^3/s) para cada cuenca.

Cuenca	Área (km^2)	Coeficiente de escorrentía (c)	Intensidad de lluvia (mm/h)	
			Periodo de 20 años	Periodo de 100 años
7	1,96	0,30	110	140
9	7,19	0,30	110	140
11	0,46	0,30	110	140
12	0,11	0,30	110	140
13	0,49	0,30	110	140
14	2,45	0,30	110	140
15	0,86	0,30	110	140
16	1,45	0,27	110	140
18	0,94	0,30	110	140
20	2,37	0,32	110	140
21	0,96	0,33	110	140
22	9,76	0,30	110	140
24	4,23	0,32	110	140
26	2,67	0,22	110	140
28	3,47	0,31	110	140
32	1,26	0,30	110	140
34	3,51	0,30	110	140
35	0,99	0,30	110	140
38	3,99	0,31	110	140
42	2,32	0,31	110	140
44	6,88	0,30	110	140
45	1,23	0,30	110	140
51	2,18	0,30	110	140
54	1,38	0,54	110	140
57	0,75	0,26	110	140
59	1,28	0,25	110	140
61	0,89	0,27	110	140
62	1,79	0,26	110	140
63	2,76	0,30	110	140
65	1,72	0,30	110	140
67	4,01	0,29	110	140

10.3. Puntos críticos

Se presenta a continuación el perfil de vulnerabilidad de obras de drenaje intermedias en el tramo analizado (Ver Figuras 7 a 11).



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

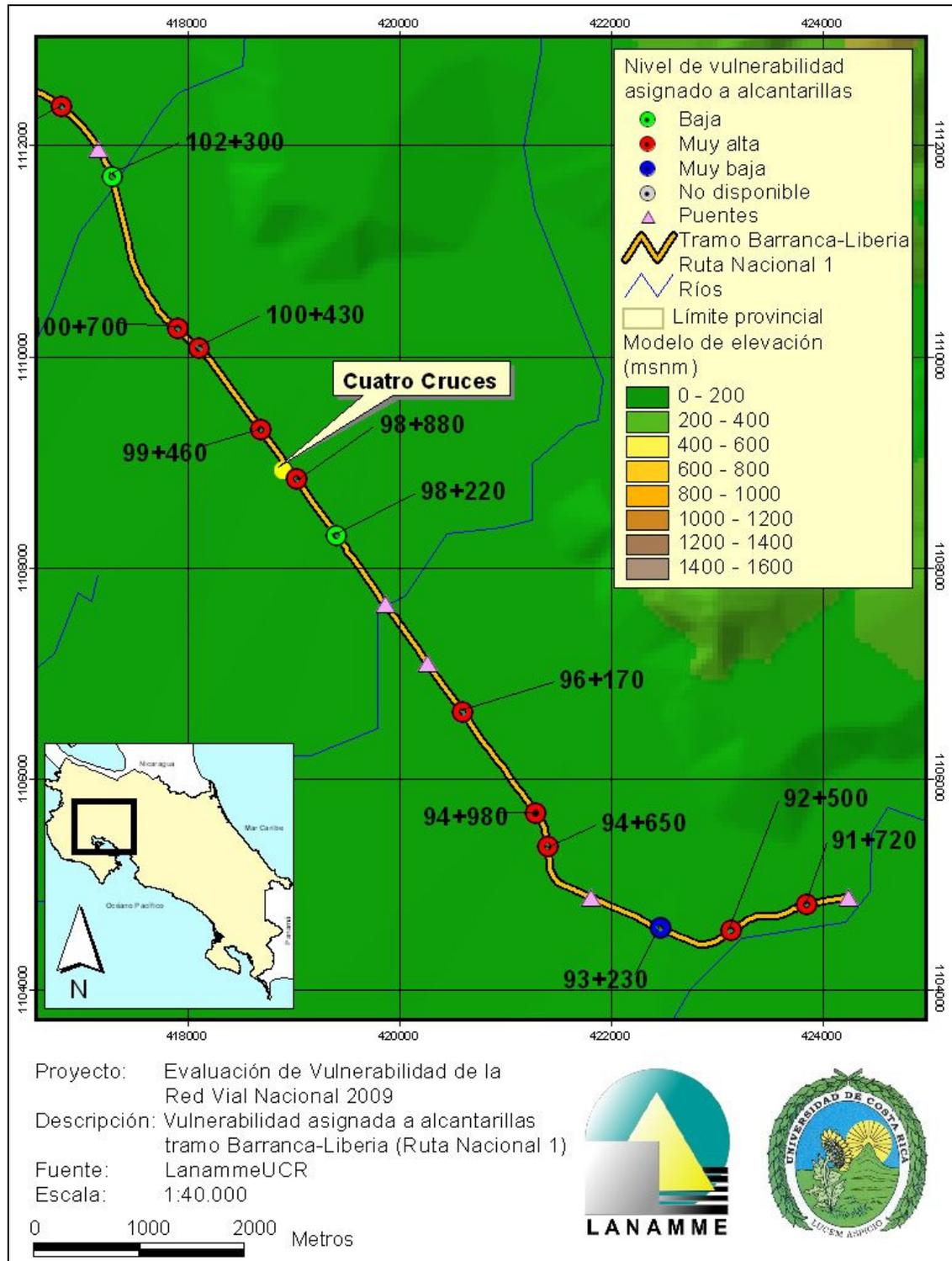


Figura 7. Vulnerabilidad de alcantarillas. (LanammeUCR, 2009).

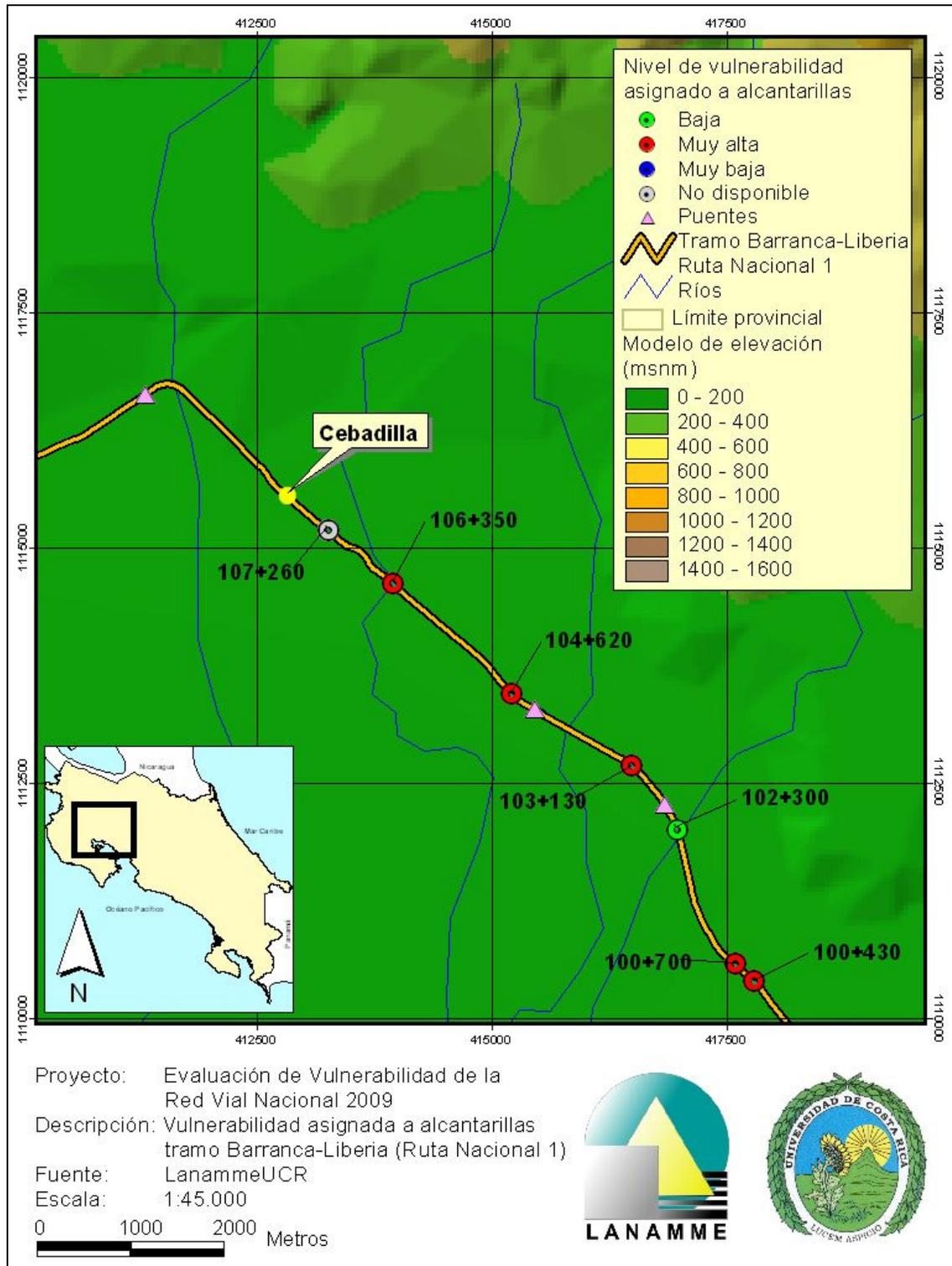


Figura 8. Vulnerabilidad de alcantarillas (cont.). (LanammeUCR, 2009).

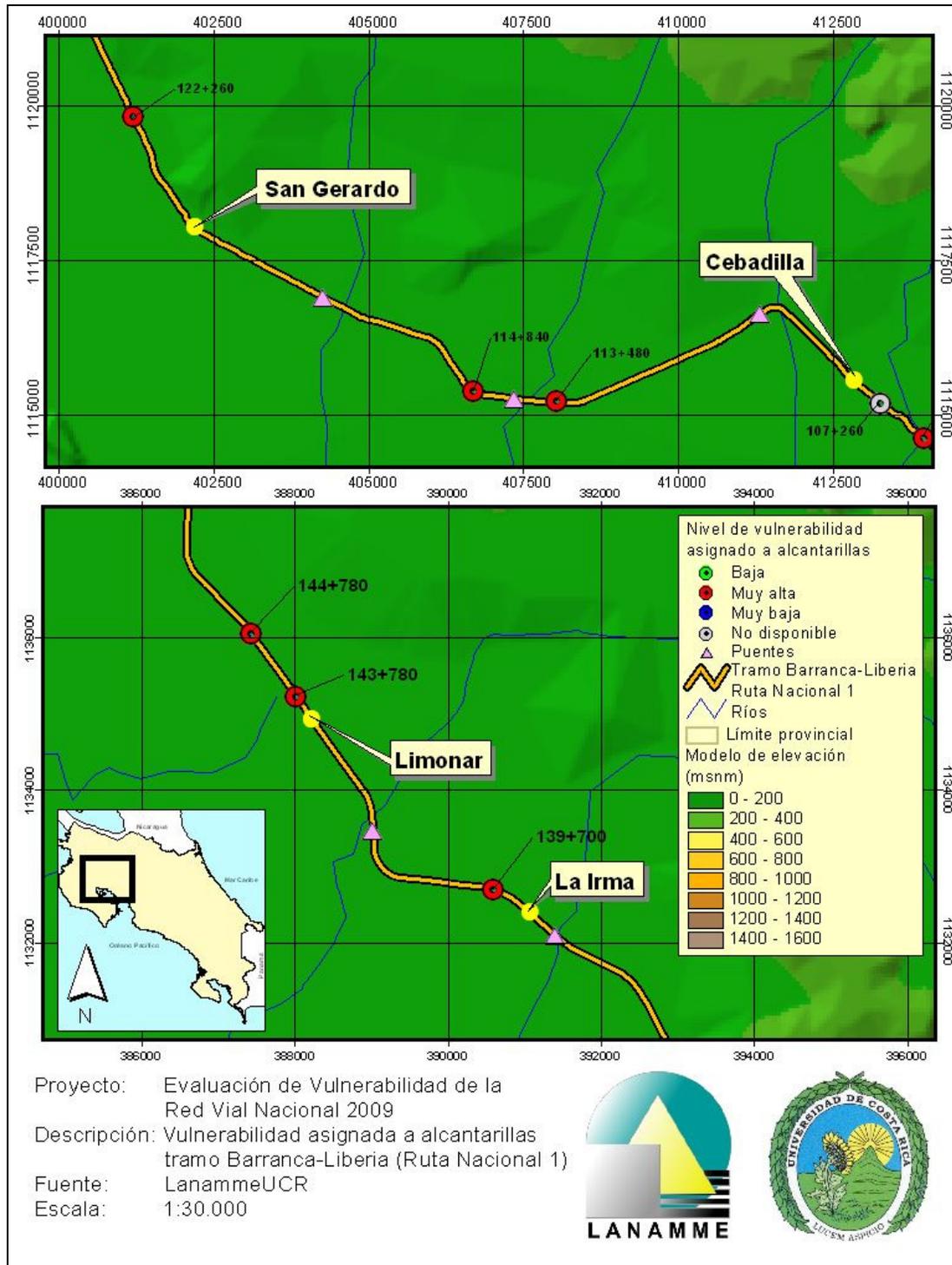


Figura 9. Vulnerabilidad de alcantarillas (cont.). (LanammeUCR, 2009).



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

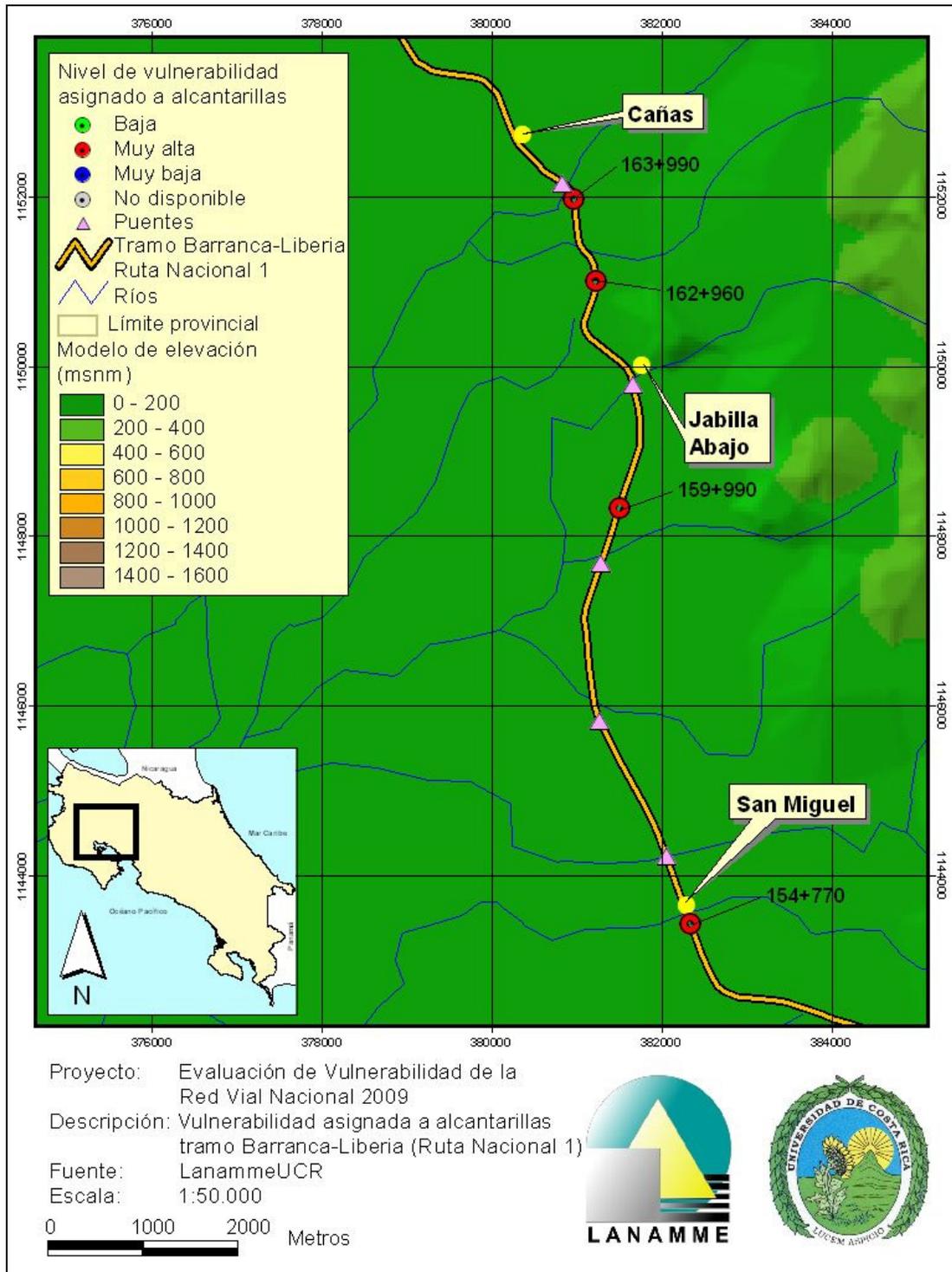


Figura 10. Vulnerabilidad de alcantarillas (cont.). (LanammeUCR, 2009).



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

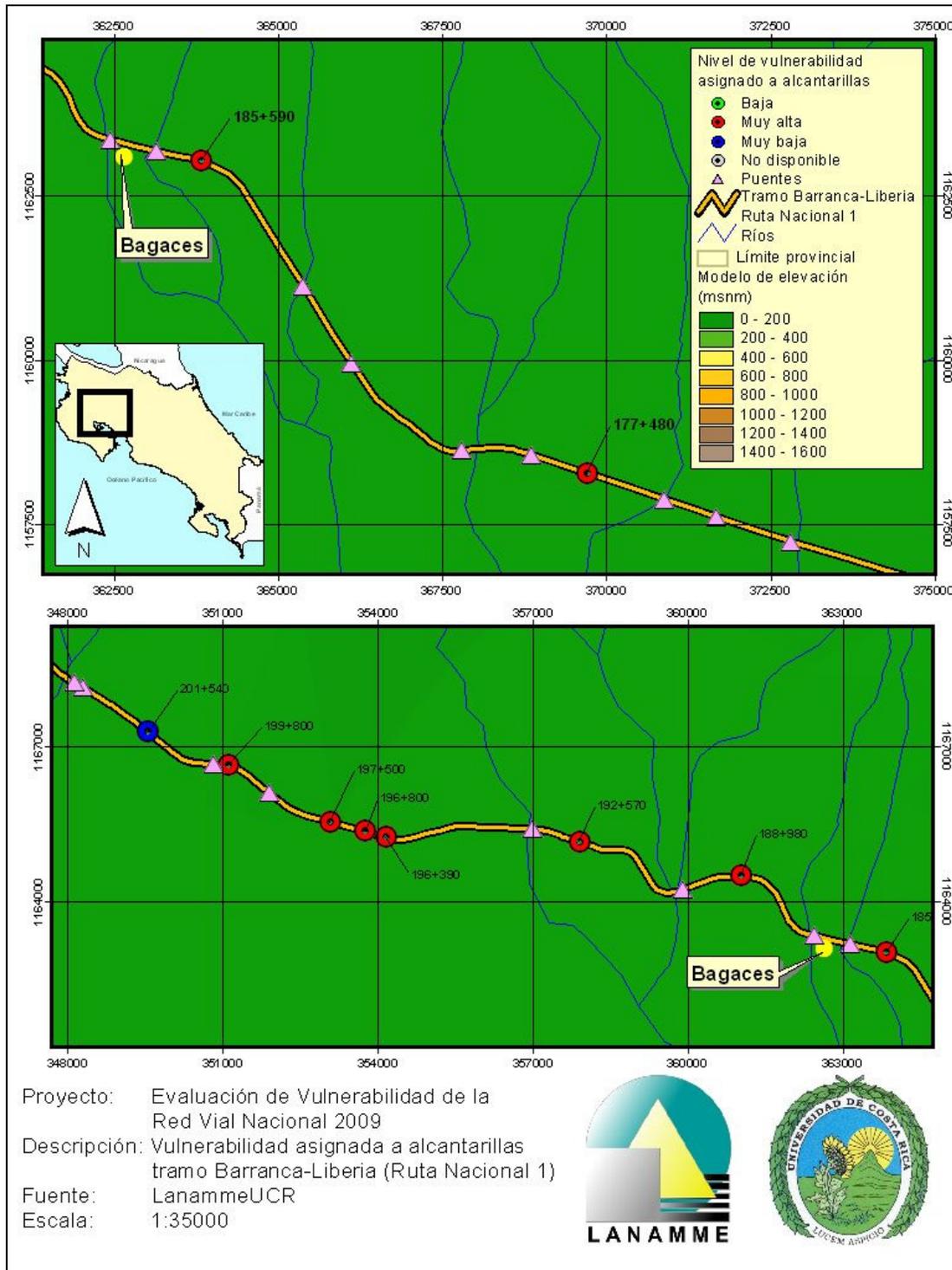


Figura 11. Vulnerabilidad de alcantarillas (cont.). (LanammeUCR, 2009).



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

La Tabla 7 resume las características de las obras de drenaje intermedias así como el nivel de vulnerabilidad asociado a cada una de ellas. Los puentes identificados en el tramo Barranca-Liberia no fueron analizados dado que requieren de una metodología de análisis distinta a la utilizada, dicho análisis se encuentra fuera del alcance de este trabajo.

Tabla 7. Resumen de puntos críticos según el nivel de vulnerabilidad.

Est.	Cuenca	Área de alcantarilla/ paso de agua (m ²)	Capacidad (m ³ /s)	Capacidad de la obra de drenaje		Nivel de vulnerabilidad
				Periodo de 20 años	Periodo de 100 años	
91+720	2	0,36	0,3	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
92+500	3	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
93+230	4	4,32	8,2	Adecuada	Adecuada	Muy baja
94+650	6	1,80	3,2	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
94+980	7	7,50	19,2	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
96+170	9	12,00	27,6	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
98+220	11	4,00	9,2	Adecuada	Adecuada	Baja
98+880	12	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
99+460	13	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
100+430	14	5,00	11,5	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
100+700	15	5,00	10,3	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
102+300	16	8,75	21,7	Adecuada	Inadecuada	Baja
103+130	18	4,00	9,2	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
104+620	20	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
106+350	21	4,00	9,2	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
107+260	22	ND ¹⁰	ND	ND	ND	ND
113+480	24	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
114+840	26	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
122+260	28	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
139+700	32	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
143+780	34	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
144+780	35	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
154+770	38	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
159+990	42	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
162+960	44	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
163+990	45	4,00	9,2	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
177+480	51	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
185+590	54	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
188+980	57	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
192+570	59	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta

¹⁰ Información no disponible



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

Tabla 7 (cont.). Resumen de puntos críticos según el nivel de vulnerabilidad.

Est.	Cuenca	Área de alcantarilla/ paso de agua (m ²)	Capacidad (m ³ /s)	Capacidad de la obra de drenaje		Nivel de vulnerabilidad
				Periodo de 20 años	Periodo de 100 años	
196+390	61	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
196+800	62	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
197+500	63	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
199+800	65	0,64	1,0	Inadecuada	Inadecuada	Muy alta
201+540	67	24,00	78,0	Adecuada	Adecuada	Muy baja

Los resultados del cálculo de los valores de caudal máximo obtenidos para períodos de retorno de 20 años y 100 años se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de caudales máximos para periodos de retorno de 20 años y 100 años.

Cuenca	Caudal (m ³ /s)	
	Periodo de 20 años (Q ₂₀)	Periodo de 100 años (Q ₁₀₀)
2	10,0	12,2
3	2,4	2,9
4	4,8	5,9
5	4,9	6,0
6	4,4	5,4
7	27,0	35,9
8	2,1	2,6
9	68,9	86,9
11	7,5	9,2
12	2,2	2,8
13	8,9	10,9
14	32,7	40,8
15	14,9	18,4
16	21,2	26,1
18	14,9	18,4
20	23,2	29,5
21	15,7	19,4
22	87,8	119,6
24	40,2	54,9
26	22,5	28,6
28	43,3	54,4
32	19,0	23,6
34	45,3	56,5
35	15,7	19,4



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

Tabla 8 (cont.). Valores de caudales máximos para periodos de retorno de 20 años y 100 años

Cuenca	Caudal (m ³ /s)	
	Periodo de 20 años (Q ₂₀)	Periodo de 100 años (Q ₁₀₀)
38	42,3	57,7
42	38,0	46,9
44	64,2	81,4
45	18,6	23,1
51	20,7	26,2
54	17,0	21,5
57	8,1	10,2
59	12,3	15,6
61	11,5	14,5
62	18,5	23,0
63	23,0	29,2
65	17,2	21,6
67	28,1	32,0

10.4. Estimación preliminar del tamaño de obras de drenaje intermedias

A partir de la metodología explicada en el apartado 9.3. y aplicando la Formula de Talbot se estimó el tamaño requerido de las obras de drenaje analizadas en apartados anteriores.

Se observa del Gráfico 1 que las obras de drenaje con una vulnerabilidad asignada de baja a muy baja se encuentran por encima del valor de C=1, valor que puede ser utilizado para señalar el límite inferior de capacidad adecuada, lo cual no corresponde con el valor de C=0,4 considerado inicialmente según la categorización topográfica realizada para la escogencia de dicho coeficiente.

A pesar de esta situación, es claro que la capacidad hidráulica de muchas de las obras de drenaje analizadas está por debajo de su nivel óptimo y debería ser revisada.

La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos para valores de coeficiente C iguales a 0,4 y 1, correspondiente respectivamente a terreno poco ondulado y terreno montañoso y escarpado.

El Gráfico 1 muestra los resultados de aplicar la fórmula de Talbot para diferentes valores del coeficiente C.



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

Tabla 9. Tamaños de las obras de drenaje según Fórmula de Talbot, para $C=0,4$.

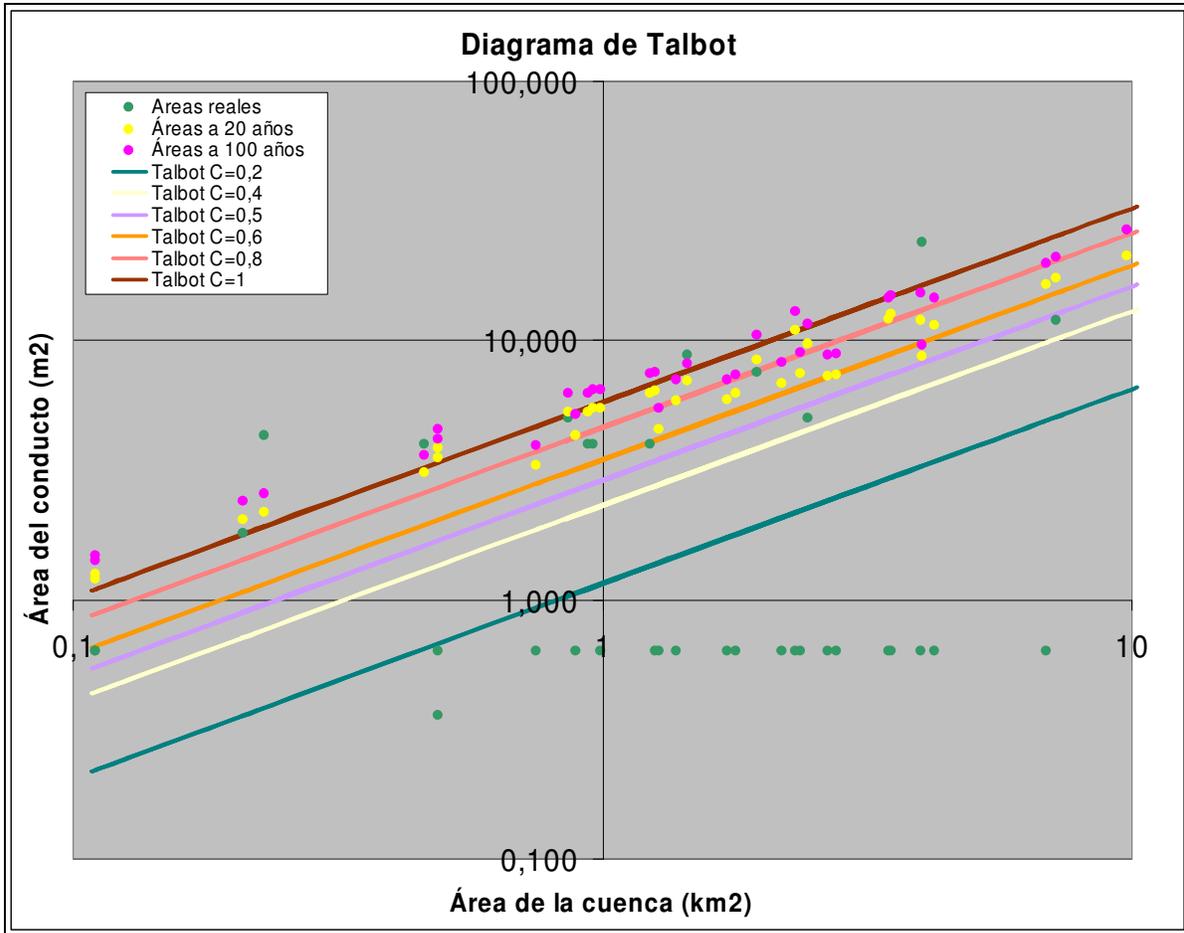
Cuenca	C=0,4	C=1
	Área de la obra de drenaje (m ²)	Área de la obra de drenaje (m ²)
2	1,4	3,4
3	0,4	1,1
4	0,8	1,9
6	0,7	1,8
7	3,8	9,6
9	10,2	25,4
11	1,3	3,2
12	0,4	1,1
13	1,4	3,4
14	4,5	11,3
15	2,1	5,2
16	3,1	7,6
18	2,2	5,5
20	4,4	11,1
21	2,2	5,6
22	12,8	32,0
24	6,8	17,1
26	4,8	12,1
28	5,9	14,7
32	2,8	6,9
34	5,9	14,8
35	2,3	5,7
38	6,5	16,3
42	4,4	10,9
44	9,8	24,6
45	2,7	6,8
51	4,2	10,4
54	2,9	7,4
57	1,9	4,7
59	2,8	7,0
61	2,1	5,3
62	3,6	9,0
63	5,0	12,4
65	3,5	8,7
67	6,6	16,4



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

Gráfico 1. Diagrama de Talbot. Área de conducto vs área de cuenca.





Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

11. Conclusiones

1. La amenaza hídrica se evaluó considerando el caudal máximo de las cuencas que corresponden solamente a pasos de agua y alcantarillas, identificados a partir de información geográfica e información recopilada en la visita de campo realizada el 11 de junio de 2009.
2. El cálculo de los caudales se realizó a través de la fórmula racional para periodos de retorno de 20 años (diseño) y de 100 años (revisión) para las cuencas correspondientes a pasos de agua y alcantarillas.
3. La vulnerabilidad de los pasos de agua y alcantarillas fue evaluada en base a su capacidad hidráulica, considerando aspectos como sus secciones transversales y el caudal máximo correspondiente a las cuencas que sirven.

Según la metodología usada, de las 35 pasos de agua y alcantarillas evaluadas, 2 presentan una vulnerabilidad muy baja (correspondiente a las cuencas 4 y 67), 2 presentan una vulnerabilidad baja (correspondiente a las cuencas 11 y 16) y 30 presentan una vulnerabilidad muy alta (correspondientes a las cuencas 2,3, 6, 7,9, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21, 24, 26, 28, 32, 34, 35, 38, 42, 44, 45, 51, 54, 57, 59, 61, 62, 63 y 65) lo que refleja que las secciones transversales son insuficientes para evacuar el caudal calculado para los diferentes periodos de retorno analizados (i.e, 20 y 100 años).

4. Se pudo identificar teóricamente que cerca del 90% de las alcantarillas analizadas presentan problemas de capacidad hidráulica, tal y como se muestra en las Figuras 7 a 11 y en la Tabla 5. No obstante, durante la visita de campo realizada se pudo observar que a pesar de que las obras de drenaje analizadas tienen asignada una vulnerabilidad alta o muy alta, estas no mostraban prueba del paso de caudales extremos asociados a tales niveles de vulnerabilidad.

No obstante esta situación, la Administración debe realizar estudios detallados y revisar los diseños de las estructuras de drenaje, por medio de un análisis hidrológico exhaustivo que considere todos los aspectos que puedan afectar el flujo del caudal de cada cuenca y su llegada a las obras de drenaje, para poder tomar las acciones correctivas y preventivas en los casos de mérito.

5. Por medio de la fórmula de Talbot se estimó, de forma preliminar, el área requerida para los pasos de agua y alcantarillas analizados. Se determinó el valor de $C=1$ para señalar el límite inferior de capacidad adecuada, aún cuando según la categorización topográfica de la zona este corresponde a un valor de $C=0,4$.

Por lo anterior, los ingenieros de la Administración deben revisar la correspondencia entre el valor del coeficiente C y la categorización topográfica asignada para su aplicación en Costa Rica, dado que los coeficientes propuestos por Talbot fueron determinados para el medio oeste de los Estados Unidos, en

Evaluación de la vulnerabilidad de obras de drenaje intermedias
Ruta Nacional 1, tramo Barranca – Liberia



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

donde la precipitación pluvial máxima es de 100 mm, valor muy inferior a la precipitación registrada en Costa Rica.



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

12. Recomendaciones

En esta sección se presentan recomendaciones generales para el tramo analizado, así como recomendaciones específicas para la amenaza evaluada (caudales extremos), con el fin de mejorar las condiciones de operación y la reducción de la vulnerabilidad de los pasos de agua y alcantarillas.

Como recomendaciones generales para la Ruta Nacional 1 se plantea:

1. Establecer formalmente por parte de las diferentes instituciones encargadas de la atención de emergencias (e.g., Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), Cruz Rojas, Cuerpo de Bomberos, Fuerza Pública) las medidas necesarias para la atención de las emergencias que se puedan dar ante amenazas naturales (e.g., amenaza sísmica, caudales extremos), con la meta de minimizar el impacto que estos fenómenos puedan tener sobre la infraestructura vial y la población que hace uso de ella.
2. Establecer por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes y el Consejo Nacional de Vialidad, un sistema de patrullaje continuo del tramo analizado para identificar, de forma preventiva, los riegos a la infraestructura que se puedan dar a raíz de eventos naturales y coordinar con las instituciones públicas que corresponda para disminuir el riesgo.

Para disminuir la vulnerabilidad de alcantarillas y pasos de agua en la zona evaluada se plantea la necesidad de que la Administración realice de forma oportuna al menos las siguientes recomendaciones:

1. Desarrollar un catálogo hidrológico con información histórica de los caudales registrados en los ríos y quebradas con afectación en la zona en estudio, con el fin de comparar los datos con los resultados obtenidos usando el método racional.
2. Realizar, para aquellos pasos de agua y alcantarillas con un nivel de vulnerabilidad alto y muy alto, un análisis hidrológico e hidráulico detallado que permita determinar el área requerida y la sección geométrica óptima, según las características particulares de la cuenca que sirve; así como realizar un análisis económico para priorizar y determinar el procedimiento óptimo de mejora o reconstrucción de las obras de drenaje intermedias con problemas.
3. Implementar un programa de mantenimiento continuo de limpieza de cunetas, alcantarillas y pasos de agua y otras obras de drenaje complementarias, para asegurar una eficiente captación y evacuación de las aguas pluviales provenientes de la carretera, de la escorrentía superficial de taludes y subterráneas, así como para evitar la saturación de terraplenes y la afectación de la calzada.



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

Se recomienda de igual manera instaurar procedimientos adecuados que aseguren el mantenimiento preventivo, más que correctivo, de las obras hidráulicas de drenaje con el fin de evitar la obstrucción de las mismas.

4. Se deben realizar estudios económicos y financieros de las medidas de mitigación y obras de mejora que se puedan utilizar para resolver los problemas identificados, con el fin de priorizar las inversiones para mejorar las condiciones de los puntos críticos.

Ing, Roy Barrantes Jiménez
Coordinador Unidad de Evaluación
de la Red Vial Nacional

Ing. Diego A. Cordero Carballo
Ingeniero Evaluador

Lic. Miguel Chacón Alvarado
Asesor legal externo



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

13. Referencias bibliográficas

1. Bogantes, R., Laporte, G., Quesada, C & Vásquez, A. (2002). *Zonificación geotécnica general de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos*. San José, Costa Rica.
2. Castro, K. (2005). *Vulnerabilidad física de la infraestructura vial en las Rutas 130, 712, 146, 120 y 126 Tramo Alajuela-Fraijanes-Vara Blanca-San Miguel de Sarapiquí*. Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
3. Denyer, P. & Kussmaul, S. (1994). *Atlas Geológico Gran Área Metropolitana*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
4. Instituto Meteorológico de Costa Rica. (2009). *Datos climáticos*. Recopilado el 06 de octubre de 2009 de www.imn.ac.cr.
5. ITGD. (2002). *Taller de capacitación El fenómeno de El Niño y la gestión de riesgo de desastres*. Proyecto Moquegua.
6. LanammeUCR. (Sin fecha). *Evaluación de la vulnerabilidad en rutas nacionales*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
7. Kanji, M. (2001). *Metodología para estimar la vulnerabilidad del terreno con relación a flujo de detritos*. I Simposio Internacional de Movimientos en Masa. Ecuador.
8. Flores, K., Denyer, P. & Aguilar, T. (2003). *Geología y estratigrafía de la Hoja Abangares, Guanacaste, Costa Rica*. Revista Geológica de América Central, 29, páginas 127-136. San José, Costa Rica: Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
9. Fernández, J., Aguilar, A., Arrieta, L., Astorga, A., Barboza, G., Barrientos, J., Bolaños, X., Bottazi, G., Bustos, I., Calvo, C., Campos, L., Escalante, G., Laurito, C., Obando, J., Pizarro, D., Rojas, J., Tejera, R., Valerín, E. & Valerio, A. (1997). *Mapa geológico de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Ministerio del Ambiente y Energía.
10. Orozco, E. (2007). *Zonificación climática de Costa Rica para la Gestión de Infraestructura Vial*. Informe de Proyecto de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil.



Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

11. Rodríguez, E. (1989). *Revisión de métodos de diseño hidrológico e hidráulico de alcantarillas para carreteras*. Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil.
12. Vargas, W. & Garro, J. (2003). *Gestión de riesgos naturales en infraestructura vial*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
13. Vargas, W. & Garro, J. (2008). *Relación entre las características geométricas y la vulnerabilidad de algunas rutas de montaña de Costa Rica*. Costa Rica: I Congreso Ibero-Americano de Seguridad Vial (I CISEV).

Noviembre, 2009

14. Anexos

Se presentan en esta sección fotografías de algunas de las alcantarillas y pasos de aguas evaluadas, mostrando su estado al día 11 de junio de 2009.



Fotografía 1. Alcantarilla Est. 91+720
(LanammeUCR, 2009).



Fotografía 2. Alcantarilla Est. 92+500.
(LanammeUCR, 2009).

Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09



Fotografía 3. Paso de agua Est. 93+230.
(LanammeUCR, 2009).



Fotografía 4. Paso de agua Est. 94+650.
(LanammeUCR, 2009).

Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09



Fotografía 5. Paso de agua Est. 94+980.
(LanammeUCR, 2009).



Fotografía 6. Alcantarilla doble Est. 96+170.
(LanammeUCR, 2009).

Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09



Fotografía 7. Alcantarilla Est. 98+220.
(LanammeUCR, 2009).



Fotografía 8. Alcantarilla Est. 98+880.
(LanammeUCR, 2009).

Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09



Fotografía 9. Alcantarilla Est. 99+460.
(LanammeUCR, 2009).



Fotografía 10. Alcantarilla Est. 100+430.
(LanammeUCR, 2009).

Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09



Fotografía 11. Alcantarilla Est. 100+700.
(LanammeUCR, 2009).



Fotografía 12. Alcantarilla Est. 102+300.
(LanammeUCR, 2009).

Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09

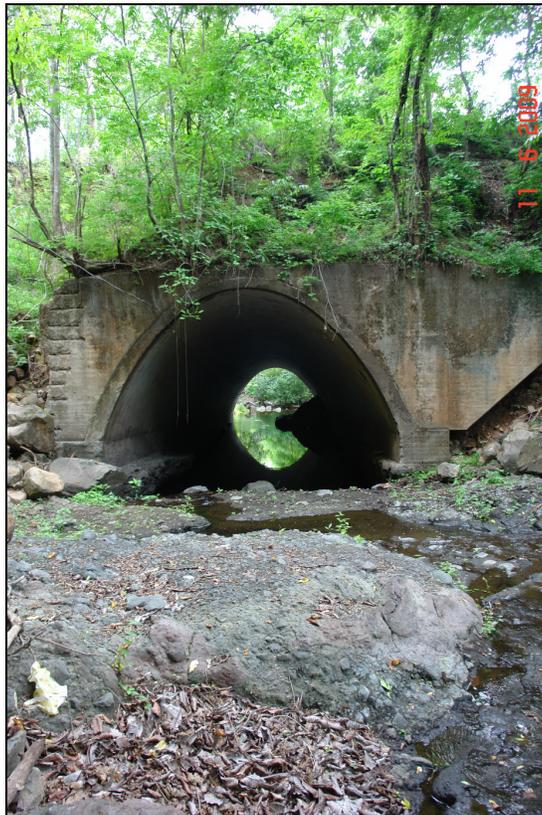


Fotografía 13. Alcantarilla Est. 103+130.
(LanammeUCR, 2009).



Fotografía 14. Alcantarilla Est. 106+350.
(LanammeUCR, 2009)

Noviembre, 2009



Fotografía 15. Alcantarilla Est. 107+260.
(LanammeUCR, 2009).



Fotografía 16. Paso de agua Est. 163+990.
(LanammeUCR, 2009).

Noviembre, 2009

LM-PI-PV-ERV-02-09



Fotografía 17. Paso de agua Est. 201+540.
(LanammeUCR, 2009).