

Capítulo 5: Determinación de daños en puentes

5.1 Metodología de análisis de daños

Para la evaluación de los daños que provocaría sobre los puentes un escenario de terremoto, es necesario utilizar curvas de fragilidad, las cuales indican la probabilidad de que un determinado estado de daños sea excedido para una aceleración pico del terreno, en función de la forma estructural del puente y sus especificaciones de diseño.

Esta metodología se basa en estudios estadísticos del comportamiento de los puentes ante sismos ocurridos en el pasado, y es una práctica muy utilizada en la actualidad debido al desarrollo de un gran número de curvas de fragilidad para distintos tipos de estructuras.

En el presente informe se utilizarán las curvas de fragilidad desarrolladas por *el Risk Management Solutions, Inc. (RMS, Ref. 19)*, organización que ha creado escenarios de sismos para regiones de California, Tokio y San Francisco. Esta metodología ofrece la ventaja de ser de fácil implementación en un sistema de información geográfica (SIG), lo que permite el análisis de zonas más extensas, tal como la Península de Nicoya.

Además del método de la RMS, existen otros enfoques que se han venido utilizando para la evaluación de puentes. A continuación se presenta un resumen de algunos de estos enfoques.

5.2 Otros enfoques existentes

De acuerdo con Basöz y Kiremidjian (1996, Ref. 4 y 9), las dos metodologías que han sido más empleadas en los Estados Unidos son la desarrollada por el Departamento de Transportes de California (CALTRANS, 1991) y la de la Administración Federal de Carreteras (FHWA, 1983).

Otras metodologías incluyen la del Departamento de Transportes de Illinois (IDOT, 1991), la del Departamento de Transportes de Washington (WSDOT, 1991), y los métodos propuestos por Kim (1992), Maffei (1995) y Kawashima y Unjoh (1990) . A continuación se presentan las características más importantes de cada método.

1. CALTRANS (California): El algoritmo de daños se basa en tres criterios principales: sismicidad, vulnerabilidad e importancia. Se desarrolla un índice de riesgo que se compone de la suma de los índices de cada uno de los atributos a evaluar del puente. Este enfoque se ha utilizado para identificar aquellos puentes con vulnerabilidad potencial a colapsar. En 1991 se modifica el método, creándose un nuevo índice de riesgo que, a diferencia del anterior, no es aditivo sino que pondera los distintos factores de acuerdo con su importancia relativa.

2. ATC/FHWA (Administración Federal de Carreteras): La FHWA identifica y califica los puentes de acuerdo con su necesidad de ser reforzados, por medio de un índice que considera la sismicidad de la zona donde se ubica el puente, la vulnerabilidad del sistema estructural y la importancia del puente.
3. IDOT (Illinois): El objetivo de esta metodología es clasificar los puentes de acuerdo con su vulnerabilidad sísmica. El riesgo se expresa como el producto de los siguientes dos criterios: la probabilidad de falla de cada puente, y las consecuencias de dicha falla. De acuerdo con el riesgo calculado, se seleccionan aquellos puentes que necesitan de un análisis más detallado.
4. WSDOT (Washington): Se desarrolla un procedimiento que considera las estimaciones de costo en un programa de reducción del riesgo sísmico de puentes. El método agrupa los puentes en cinco categorías de prioridad, de acuerdo con diferentes tipos de deficiencias. Puentes de una misma categoría son ordenados de acuerdo con su importancia relativa.
5. Kim (1992): utiliza un programa de análisis de riesgo basado en un Sistema de Información Geográfica (SIG). El uso de un enfoque basado en un SIG permite integrar una amplia variedad de información necesaria para evaluar el impacto de terremotos u otras amenazas naturales en un sistema de puentes primarios y secundarios. El método se basa en un índice de daño determinado a partir de la información recopilada para 109 puentes dañados en 11 distintos terremotos.
6. Maffei (1992) propone un método de priorización basado en un análisis de beneficio/costo y una estimación de pérdidas por terremotos. El método incluye un sistema de calificación de acuerdo con la vulnerabilidad sísmica y fórmulas para estimar el valor del puente y el costo del reforzamiento estructural.
7. Kawashima y Unjoh (1990) proponen un método de inspección de puentes para determinar su vulnerabilidad sísmica en función de sus características estructurales. Para ello, analizaron 124 puentes japoneses que sufrieron cierto grado de daños en los terremotos de 1978 (M7.4), 1964 (M 7.5), 1948 (M 7.3), y 1923 (M 7.9). El método considera una aceleración pico del terreno de 0.25 g, y asigna factores multiplicativos a cada puente de acuerdo con el tipo de estructura, materiales, año de construcción, dimensiones del puente y condiciones del suelo.

Basöz y Kiremidjian (1996, Ref. 4) sugieren que los métodos descritos anteriormente poseen una serie de defectos, debido a la forma en que se calculan los “puntajes” finales de los puentes. Entre los problemas detectados se pueden citar:

- Problemas con los índices aditivos: los *puntajes* utilizados por el FHWA y el CALTRANS para asignar las categorías de daños a las estructuras, son el resultado de una simple suma de los puntajes de los componentes. Esto hace que los métodos sean particularmente insensibles a los riesgos relativos, lo que genera resultados dudosos en aquellos puentes con vulnerabilidad media ante un sismo.

- Potencial inconsistencia en la asignación de los factores de ponderación: los enfoques del WSDOT, del CALTRANS y del FHWA poseen una tendencia a asignar factores de ponderación inadecuados, debido a que algunos de los parámetros considerados resultan dependientes entre sí y afectan los resultados.
- Consideración de la sismicidad y la vulnerabilidad como criterios independientes: no se toma en consideración que la vulnerabilidad de un puente depende directamente del nivel de aceleración del terreno.
- Falta de consideración de la forma estructural de los puentes: no se presta adecuada atención al comportamiento diferenciado entre las distintas estructuras con las que se puede diseñar un puente, al no considerar curvas de fragilidad diferentes de acuerdo con la forma estructural.

5.3 Descripción del método del “Risk Management Solutions, Inc”.

El método del RMS es el más reciente que se encuentra disponible en la literatura. Fue publicado en 1997, y para su elaboración, se analizaron varios de los métodos mencionados anteriormente (específicamente los de Kim, FHWA, y ATC).

Este método sí considera el comportamiento diferenciado de los tipos estructurales de puentes. Además, por la forma en que se analizan los puentes, el método no introduce errores por consideraciones aditivas o multiplicativas de puntajes de puentes, que como se mencionó puede dar resultados inconsistentes para ciertos rangos de vulnerabilidad.

Este método consiste en la utilización de curvas de fragilidad para puentes, de acuerdo con sus características estructurales, las cuales permiten conocer el estado de daños de un puente si se conoce el valor de la aceleración pico del terreno (la aceleración pico en cada puente se calculó en el Capítulo 3 para el escenario de un terremoto en Nicoya).

Para realizar el análisis, los puentes deben ser *agrupados* de acuerdo con sus características estructurales. Posteriormente estos grupos se relacionan con la aceleración pico del terreno por medio de funciones de daño, que analizan el efecto de la sollicitación sísmica sobre cada uno de los componentes del puente. El método incluye *curvas de restauración* con las que es posible determinar el tiempo de reparación necesario para obtener un cierto porcentaje de funcionalidad en el puente analizado. Sin embargo, estas curvas se basan en los rendimientos de construcción y la disponibilidad de materiales de la zona de California, por lo que no se utilizarán en este proyecto por considerarlas no aplicables a las condiciones de Costa Rica.

A continuación se describe con detalle cada uno de los componentes del método.

5.3.1 Clasificación de puentes

El daño causado a un puente por las solicitaciones sísmicas está directamente relacionado con las propiedades estructurales del puente. Cuando se desea analizar un gran número de puentes, no es posible evaluar el comportamiento sísmico de cada uno de éstos, sino que deben ser primero clasificados en grupos de acuerdo con sus características.

Los puentes son clasificados de acuerdo con tres distintos criterios, tal como se muestra a continuación:

1. Tipo:

- Puentes de gran tamaño: aquellos con al menos una luz de 150 m.
- Puentes continuos: aquellos con luces menores de 150 m, continuos y monolíticos.
- Puentes simplemente apoyados: aquellos con una o varias luces menores de 150 m y apoyos simples.

2. Diseño sismo-resistente

- Puentes con diseño sismo-resistente: aquellos diseñados con los criterios sismo-resistentes de los códigos modernos, o reforzados para cumplir con tales características.
- Puentes con diseño convencional: es decir, aquellos diseñados sin tomar en cuenta los criterios de diseño sismo-resistente.

3. Características de alto riesgo

Los puentes con atributos que incrementan su vulnerabilidad sísmica son clasificados como de “alto riesgo”. Se incluyen los puentes que cumplan con alguno de los siguientes atributos:

- Superestructura con forma irregular, ya sea forma *curveada* o sesgado respecto al eje del río (se consideran de alto riesgo sólo aquellos sesgos mayores de 45° y las curvas mayores de 90°)
- Puentes construidos con códigos anteriores al AASHTO de 1973 deben ser considerados de alto riesgo (Kim, 1993).
- Número de luces: puentes simplemente apoyados con más de una luz deben ser considerados de alto riesgo, debido al pobre comportamiento de las pilas centrales.

La combinación de los tres criterios anteriores permiten definir 12 categorías diferentes, tal como se muestra en la Tabla 5-1.

5.3.2 Definición de los estados de daño

Se definen cinco estados de daño para los puentes, que se presentan a continuación:

- *Ningún daño (ds_1):* el puente no presenta daño.
- *Daño menor (ds_2):* agrietamiento menor y descascaramiento de los bastiones, así como agrietamiento menor en las columnas. Los daños no requieren más que un *tratamiento cosmético* de reparación.
- *Daño moderado (ds_3):* las columnas experimentan un agrietamiento moderado y descascaramiento, pero la columna es estructuralmente funcional. Se presenta un asentamiento de los accesos, y en las conexiones se agrietan las llaves de cortante y se *tuercen* los pernos.
- *Daño generalizado (ds_4):* las columnas se degradan sin colapsar (columnas estructuralmente inseguras), las conexiones pierden parcialmente su capacidad soportante, y se da un asentamiento mayor en los accesos.
- *Daño total (ds_5):* las columnas colapsan y las conexiones pierden toda su capacidad soportante, lo que implica un inminente colapso de la losa de piso.

5.3.3 Funciones de daños de puentes

Para las seis categorías principales de puentes, los estados de daño son identificados y descritos con referencia al tipo de daño que ocurre en los subcomponentes de los puentes (En el Anexo G se muestran las distintas partes de un puente). En estos se incluyen elementos estructurales o porciones del puente, tal como columnas, bastiones, losa de piso, accesos y conexiones. Para los puentes clasificados como de *alto riesgo*, las curvas de fragilidad de los seis tipos de puentes son ajustadas para reflejar el comportamiento desfavorable que se espera de estas estructuras.

Las curvas de fragilidad están basadas en la combinación probabilística de las funciones de daño de los componentes, utilizando *operadores lógicos booleanos*¹ para describir la relación entre ellos. El operador lógico que los relaciona considera que ante un daño en cualquiera de los subcomponentes, se tiene un daño en el puente. En la Fig. 5-1 se muestran las relaciones de fragilidad de los subcomponentes, que se adicionan para obtener la curva correspondiente al puente.

La Tabla 5-2 muestra el algoritmo de daños para puentes, de acuerdo con la clasificación de los mismos, y en función de la aceleración pico del terreno.

Las curvas de fragilidad son la representación gráfica de las funciones de daño mostradas en la Tabla 5-2. La Fig. 5-2 muestra, a manera de ejemplo, la curva de fragilidad de un puente clasificado como HBR5, para las distintas categorías de daño. El resto de las curvas de fragilidad pueden consultarse en el Anexo D.

¹ Los operadores lógicos booleanos son del tipo 'y', 'o', 'no', etc.

5.4 Revisión de la metodología para el sismo de Limón

Para poder comprobar la aplicación de la metodología para determinar el daño que podría sufrir cada puente, se utilizó la información generada por el sismo del 22 de abril de 1991 en Limón.

El sismo de Limón ocurrió a las 3:57 p.m. y su epicentro se ubicó a 39.5 km al sur-suroeste del Puerto de Limón a una profundidad de 21 km, con origen en una falla intraplaca y una magnitud momento de 7.7 (Ref. 22).

Para la zona de Limón se efectuó el mismo análisis que se utilizará en la región de Guanacaste posteriormente, con la diferencia que en Limón se tienen los registros de aceleraciones máximas del sismo y además se conoce el daño que sufrió cada puente de la región. El objetivo es comparar los resultados de la metodología con los daños reales sufridos por los puentes en la zona de Limón.

Para el caso de Limón, se utilizaron las relaciones de atenuación formuladas por Joyner, Boore y Fumal (Ref. 5) , para determinar la aceleración pico horizontal en sismos originados por fallas inversas como es el caso de Limón. Este método considera que para zonas de roca que se encuentren sobre la superficie de falla se pueden generar aceleraciones hasta de 0.8g, valor que se incrementa a 0.9g en aquellos lugares donde existe suelo (considera una velocidad de la onda de corte para suelo de 310 m/s). Una descripción más detallada del método de Joyner, Boore y Fumal se puede estudiar en el Anexo A.

Para la determinación de la aceleración pico para el sismo de Limón se determinaron las zonas de roca y suelo de acuerdo con el Mapa Geológico de Costa Rica en escala 1:200 000 y se utilizaron las siguientes ecuaciones de atenuación:

- Para determinar la aceleración en roca:

$$\ln(Y) = -0.117 + 0.527 * (M - 6) - 0.778 * \ln(r) - 0.371 * \ln\left(\frac{620}{1396}\right), \quad (1)$$

y en forma similar la aceleración en suelo se obtiene mediante:

$$\ln(Y) = -0.117 + 0.527 * (M - 6) - 0.778 * \ln(r) - 0.371 * \ln\left(\frac{310}{1396}\right), \quad (2)$$

$$\text{para los dos casos } r = \sqrt{(r_{jh}^2 + 5.57^2)}$$

Para poder determinar la validez de estas relaciones en la zona de Limón y el sismo del 22 de abril de 1991, se utilizaron los reportes de aceleración máxima horizontal obtenida por la red de acelerógrafos del Programa de Medición de Sismos Fuertes (Ref. 22).

En la Tabla 5-3 se muestran los valores de aceleración máxima registrada por cada una de las estaciones y en la Fig. 5-4 se puede observar que las curvas para suelo y roca derivadas de las relaciones de Joyner, Boore y Fumal se encuentran dentro de un rango de variación

aceptable con respecto a los registros obtenidos, además se puede observar que para los registros más cercanos al área de ruptura las relaciones de atenuación son conservadoras.

Utilizando las ecuaciones (1) y (2) junto con el SIG, se obtuvo el mapa de aceleraciones pico para la zona de Limón, como se observa en el Mapa 5-1. Se utilizaron 12 puentes de los cuales se tenía conocimiento de los daños que habían sufrido durante el sismo del 22 de abril de 1991, los cuales se resumen en la Tabla 5-4. Aplicando la metodología descrita en la sección 5.3, se obtiene la categoría de daño esperado para cada uno de los puentes, tal como se muestra en la Tabla 5.4.

En el Mapa 5-2 se muestra la distribución espacial y el respectivo nivel de daño esperado para cada puente en estudio.

Con base en fotografías del estado de los puentes pocos días después de sucedido el sismo de Limón, se logró determinar el nivel de daño real sufrido. Los resultados se muestran en la Tabla 5-5, donde se compara el daño esperado según el método con el daño observado, y además se presenta una breve descripción de los principales daños sufridos por los puentes.

Como se observa en la Tabla 5-5, para la mayoría de los puentes el nivel de daño esperado concuerda con el daño que sufrió el puente, y en aquellos como Río Cuba, Río Blanco y Quebrada Calderón el método sobrestimó el nivel de daño en un grado. Se nota que en ningún caso el método subestimó los resultados.

En el Anexo E se incluyen fotografías de los daños sufridos en estos puentes, facilitadas por el Programa de Ingeniería Sísmica (Ref. 23).

5.5 Daños causados por el efecto de la aceleración

El análisis de daños para los puentes de Guanacaste se realizó de acuerdo con el método descrito en la sección 5.3, aplicándolo de forma similar a como se hizo en Limón. El inventario de puentes se obtuvo de la base de datos facilitada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) para todo el país, seleccionando de este mapa la zona en estudio (esta zona se muestra en el Mapa 5-3). Esta base de datos se revisó con la información disponible en las hojas 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional, y con giras de inspección.

La base de datos, elaborada en forma conjunta por el MOPT y la Agencia de Cooperación Alemana (GTZ), da un inventario bastante preciso del número de puentes existentes en Guanacaste, pero contiene información incompleta, o a veces errónea, de las dimensiones del puente, así como de la fecha de construcción. Además, no incluye cierta información indispensable tal como tipo de apoyos, materiales, forma estructural, y otros.

Por ello, fue necesario realizar un total de 6 giras de inspección de puentes para obtener la información faltante y corregir la errónea. La información recopilada en las giras se resume en el Anexo F.

Se determinó que en la zona existen 305 puentes, pero muchos de estos realmente corresponden a alcantarillas o a estructuras de tamaños reducidos. Para el análisis de daños, se seleccionaron aquellos puentes de longitud mayor a 25 metros en la Península de Nicoya (donde se dan las mayores aceleraciones) y mayores a 30 metros en el resto de la región.

Así mismo, se consideraron solo los puentes ubicados sobre vías importantes. Se reduce así el número de puentes a evaluar a 61 puentes. Estos se clasificaron de acuerdo con sus características estructurales, fechas de diseño y dimensiones, información obtenida en las giras y complementada con los planos disponibles en el MOPT (ver Anexo F).

Con las aceleraciones pico derivadas en la sección 3.3 de este informe (ver el Mapa 3-3), y mediante la aplicación de las curvas de fragilidad se obtienen las intensidades de daños esperadas en los puentes de la región en estudio. Los resultados obtenidos se muestran en el Mapa 5-4. Los números que se muestran en el mapa corresponden a los códigos de identificación de los puentes, de acuerdo con la Tabla 5-6 (en ésta se muestra además el nivel de daño esperado en cada puente para el terremoto en estudio).

Entre los puentes evaluados se incluyó el puente ferroviario sobre el Río Barranca. Para este puente se utilizaron las curvas de fragilidad correspondientes a puentes ferroviarios de la *Risk Management Solutions, Inc.* (Ref. 19), las cuales son similares a las de puentes de carretera pero derivadas con información exclusivamente de puentes de rutas de tren.

De esta forma se determina el daño causado a los puentes, directamente por el efecto de la aceleración del terreno sobre la estructura. Debe considerarse, además, la posibilidad de que la licuación dañe la estructura de un puente. Este efecto se analiza a continuación.

5.6 Daños esperados debido a la licuación

El análisis de daños para los puentes se complementa con la consideración de los daños que causaría sobre la estructura una eventual licuación del terreno sobre el que se cimienta. Para ello, se considera la deformación permanente del terreno causada por la licuación (deducida en el Capítulo 4) como el parámetro causante del daño, y se utilizan las curvas de fragilidad del Anexo A, las cuales se resumen en forma tabular en la Tabla 5-7.

La aplicación del método es similar a como se hizo con la aceleración del terreno, con la diferencia de que el dato de entrada es ahora la deformación permanente del terreno asociada con el fenómeno de licuación. Los daños causados por licuación se muestran en el Mapa 5-5, y se resumen en la Tabla 5-8, para aquellos puentes ubicados en las zonas donde ocurre licuación.

5.7 Daños ocasionados por la combinación de efectos de la aceleración y la licuación

Para combinar de los efectos de licuación y de aceleración pico, se consideró que en aquellos puentes que sufren de ambos fenómenos el daño final será el mayor de los daños causados por la aceleración y la licuación. De esta forma, se combinan los Mapas 5-4 y 5-5, conservándose la intensidad de daños mayor para cada puente. El resultado es el Mapa 5-6, resultado final de la evaluación de puentes. La información de este mapa se resume en la Tabla 5-9.

Los daños más graves (daño total, ds5) se presentan en los puentes sobre los ríos Diriá, Garza, Bejuco, Juan de León, Guajiniquil, Tempisque nuevo, Tempisque viejo, Sardinal, Belén, Cecilia, Marote, Nandayuri y la Quebrada Tigra.

El puente sobre el Río Diriá, así como los dos puentes sobre el Río Tempisque, se ubican sobre la ruta 21, en el tramo que comunica la ciudad de Santa Cruz, con Belén y Liberia. Por su ubicación, estos puentes no cuentan con una redundancia dentro del sistema. Se considera que los puentes cuentan con una importancia estratégica dentro del desarrollo económico de la región y deberán estudiarse con mayor detalle para hacerles un reforzamiento estructural.

Los puentes sobre los ríos Juan de León, Guajiniquil, y la Quebrada Tigra, ubicados sobre la ruta 163, comunican las poblaciones de Jicaral, Dominica, La Fresca y Jabillos.

La falla del puente sobre el río Garza provocaría la interrupción del flujo sobre la vía 160, ruta costera sin redundancia en el sistema, y dificultaría el acceso a Corozalito, población costera. Por su parte, el puente sobre el Río Garza (ruta 160) dificultaría el acceso a Nosara, donde solo se podría llegar con un largo recorrido por esta ruta hacia el norte, llegando a Marbella.

La falla de los puentes sobre los ríos Maroto y Nandayuri interrumpirían el flujo en la ruta 21, principalmente la comunicación entre Carmona, Jicaral y Dominica. La falla simultánea de los puentes sobre las rutas 21 y 160 provocarían un aislamiento del sector sur de la Península de Nicoya.

Debe considerarse así mismo la gran cantidad de puentes de daño general (ds4) en la Península de Nicoya, que podrían incluso aislar la región después de ocurrido el terremoto en estudio. También debe considerarse que sobre la ruta Interamericana la mayor parte de los puentes no sufren daño, o sufren un daño leve, por lo que es pequeño el efecto esperado sobre esta vía tan importante para el desarrollo de la región y para la exportación de productos a Centroamérica.

Tabla 5-1: Clasificación de puentes (RMS, Ref. 19)

Código	Descripción
HBR1	Puente de gran tamaño -- diseño sismo-resistente
HBR2	Puente de gran tamaño -- diseño convencional
HBR3	Puente continuo -- diseño sismo-resistente
HBR4	Puente continuo -- diseño convencional
HBR5	Puente simplemente apoyado -- diseño sismo-resistente
HBR6	Puente simplemente apoyado -- diseño convencional
HBR7	Puente de gran tamaño -- diseño sismo-resistente -- de <i>alto riesgo</i>
HBR8	Puente de gran tamaño -- diseño convencional -- de <i>alto riesgo</i>
HBR9	Puente continuo -- diseño sismo-resistente -- de <i>alto riesgo</i>
HBR10	Puente continuo -- diseño convencional -- de <i>alto riesgo</i>
HBR11	Puente simplemente apoyado -- diseño sismo-resistente -- de <i>alto riesgo</i>
HBR12	Puente simplemente apoyado -- diseño convencional - de <i>alto riesgo</i>

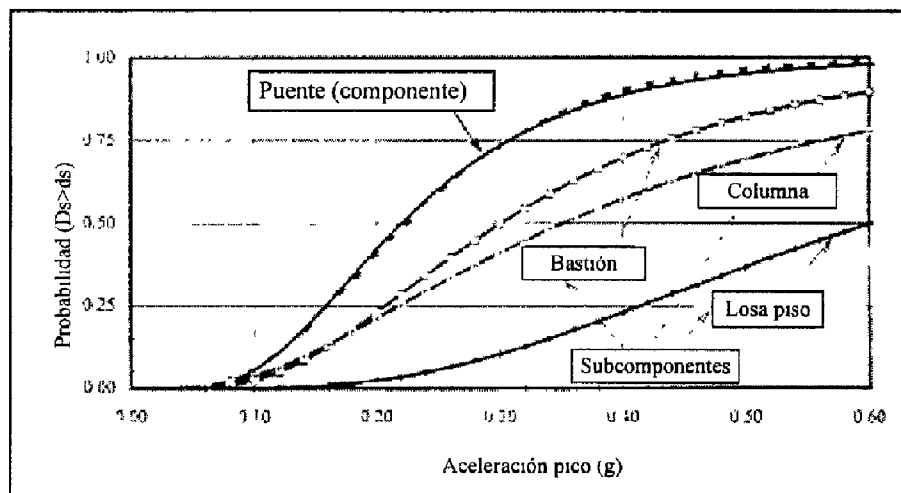


Fig. 5-1: Relación entre la curva de fragilidad de un puente y las de sus componentes (adaptado de la Ref. 19)

Tabla 5-2: Valor medio de aceleración pico como función de los daños en los puentes (Ref. 19)

Clasificación \ Daño	Mediana de la aceleración pico del terreno (fracción de g)			
	Daño menor (ds2)	Daño moderado (ds3)	Daño generalizado (ds4)	Daño total (ds5)
HBR1	0,38	0,46	0,62	1,5
HBR2	0,32	0,43	0,55	1,25
HBR3	0,28	0,42	0,55	1,2
HBR4	0,18	0,37	0,48	0,90
HBR5	0,22	0,34	0,39	0,85
HBR6	0,11	0,22	0,26	0,60
HBR7	0,30	0,37	0,50	1,2
HBR8	0,26	0,34	0,44	1,00
HBR9	0,22	0,34	0,44	0,96
HBR10	0,14	0,30	0,38	0,72
HBR11	0,18	0,27	0,31	0,68
HBR12	0,09	0,18	0,21	0,48

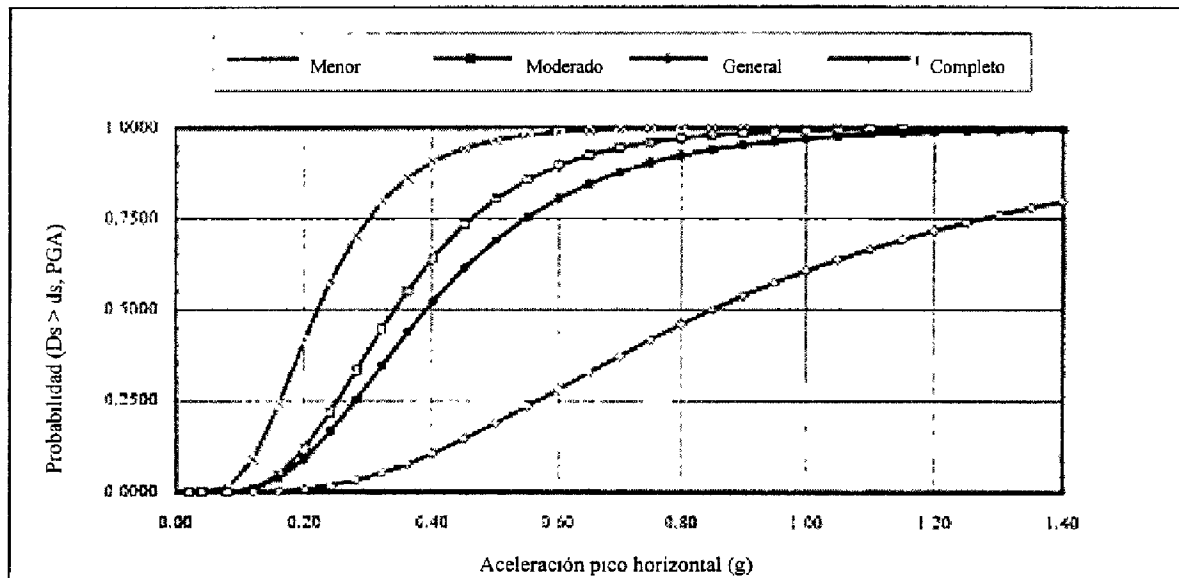


Fig. 5-2: Curvas de fragilidad para puentes simplemente apoyados con diseño sismo-resistente (HBR5). Adaptado de la Ref. 19.

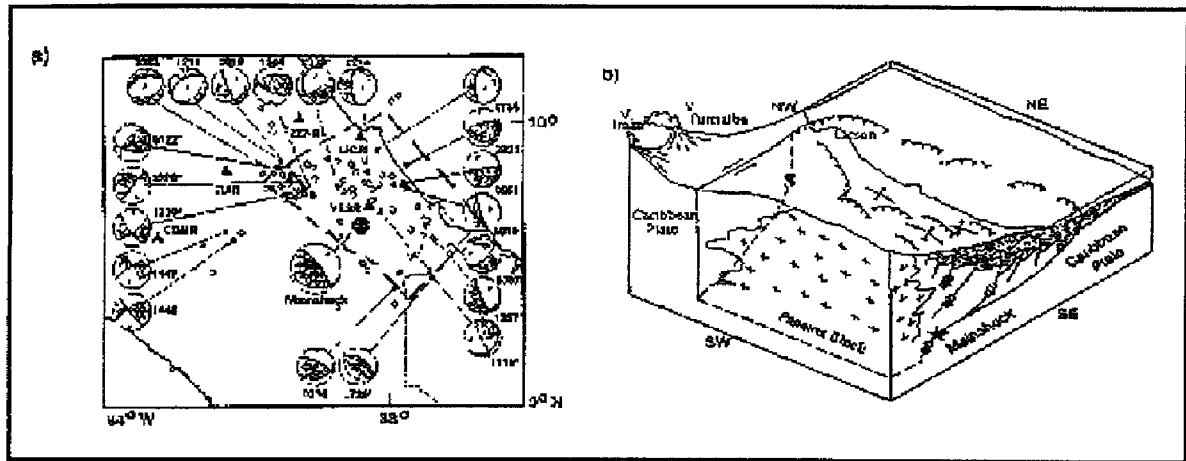


Fig. 5-3: (a) Delimitación del área de falla a partir de la localización del sismo principal de Limón y réplicas (b) Diagrama esquemático que muestra la geometría de la falla del sismo de Limón (Ref. 25)

Tabla 5-3
Registros de aceleración horizontal del sismo de Limón (Ref. 22)

Estación	Aceleración (%g)
Cachí	0.15
Cartago	0.27
San Isidro	0.20
San José - Guatuso	0.06
San José - UCR	0.20
San José Aurola	0.07
San José BNCR	0.08
San José Hatillo	0.12
Golfito	0.06
Alajuela CIPET	0.11
Quepos	0.04
Puriscal	0.09
San Ramón	0.09

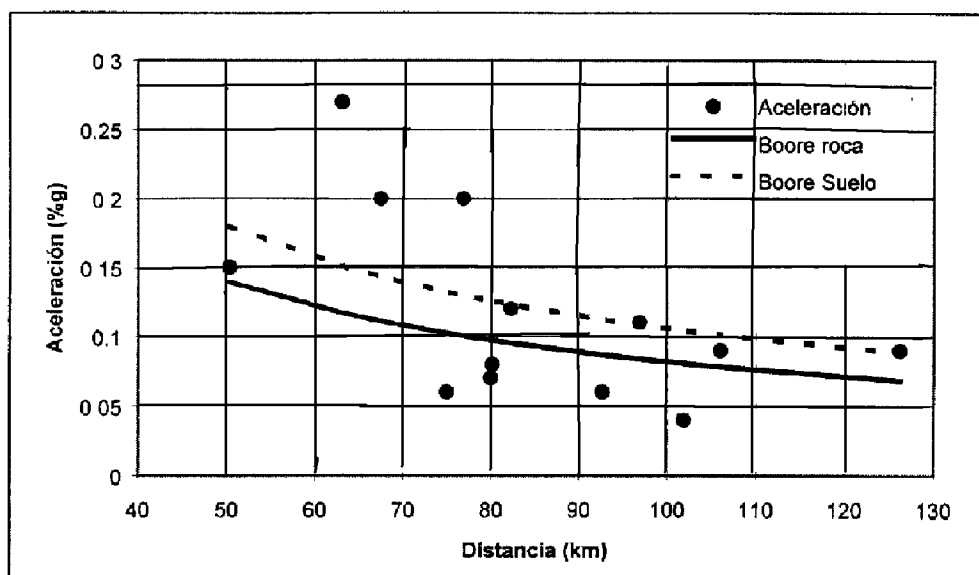


Fig. 5-4: Comparación entre las estimaciones de Joyner, Fumal y Boore con las aceleraciones registradas para el sismo de Limón.

Tabla 5-4: Puentes utilizados para el análisis de daños de Limón*

Puente	Ruta	Nivel de daño
R. Reventazón	32	2
Paso desnivel sobre ruta 32	10	2
O. Calderón	32	4
R. Chirrinó	32	3
R. Cuba	32	5
R. Blanco	32	5
R. Banano	36	5
R. Vizcaya	36	5
R. Bananito	36	5
R. Estero Negro	36	5
R. Estrella	36	5
R. Sixaola	36	2

* En el Anexo E se presenta una mayor información de cada uno de estos puentes.

Tabla 5-5: Comparación de los daños esperados, utilizando el método de la RMS, con el daño real observado.

Código	Puente	Daño calculado	Daño observado	Descripción del daño observado
1	R. Chirripó	ds3	ds3	El puente se movió en sentido transversal. Pernos doblados. Desplazamiento del balancín. Colapso de uno de los accesos.
2	R. Cuba	ds5	ds4	Bastiones corridos. Pilotes levantados y quebrados. Desplazamiento de las pilas.
3	R. Blanco	ds5	ds4	Desplazamiento y volcamiento de bastiones. Pilotes quebrados. Pernos pandeados. Falla por sesgamiento del puente. Ruptura en apoyos de nervaduras de las vigas.
4	R. Banano	ds5	ds5	Rotación de bastiones. Pilotes quebrados. Pernos torcidos. Asentamiento severo en los accesos.
5	R. Vizcaya	ds5	ds5	Dos tramos del puente colapsaron. Bastiones corridos y pilotes expuestos.
6	R. Bananito	ds5	ds5	Colapso general del puente. Todos los tramos del puente se cayeron.
7	Estero Negro	ds5	ds5	Rotación de bastiones. Pilotes quebrados. Daño de cortante en las pilas producido por los pernos de apoyo. Colapso de uno de los tramos del puente.
8	R. Estrella	ds5	ds5	Colapso general del puente. Los dos tramos que lo formaban se cayeron. Asentamiento severo de los accesos. Corrimiento y rotación de bastiones.
9	R. Reventazón	ds2	ds2	Sin daño estructural
10	Paso a desnivel sobre la ruta 32	ds2	ds2	Sin daño estructural
11	Q. Calderón	ds4	ds3	Bastiones corridos. Grietas en los bastiones. Pernos torcidos y pilotes quebrados.
12	R. Sixaola	ds2	2	Sin daño estructural

Tabla 5-6: Código y daño esperado en cada puente debido a la aceleración del terreno

Cód.	Nombre del Río	Daño	Cód.	Nombre del Río	Daño
1	R. Tulín	1	32	R. Ahogados	2
2	R. La Mona	1	33	R. Azufrado	1
3	R. Agujas	1	34	R. Tempisquito	1
4	R. Tarcolitos	1	35	R. Tempisque Nuevo	4
5	R. Grande De Tácoles	1	36	R. Tempisque Viejo	4
6	R. Jesús María	1	37	R. Belén	4
7	Estero Mata De Limón	2	38	R. Cañas	4
8	R. Barranca	1	39	R. En Medio	4
9	P.S.S R.23	1	40	R. Diría	5
10	R. Barranca	2	41	R. Marote	4
11	R. Barranca (Ferroviario)	1	42	R. Nandayuri	4
12	R. Naranjo	2	43	R. Sardinal	4
13	R. Ciruelas	2	44	Q. Toyosa	4
14	R. Seco	2	45	R. Coyolito	4
15	R. Aranjuez	1	46	Q. Lima	4
16	R. Guacimal	2	47	R. Andamojo	4
17	R. Lagarto	2	48	R. Tabaco	4
18	R. Abangares	2	49	R. Cuajiniquil	4
19	R. Hígueron	2	50	R. Nosara	4
20	R. Cañas	2	51	R. Garza	5
21	R. Corobicí	2	52	R. Bejuco	5
22	R. Tenorio	1	53	R. Juan De León	5
23	R. Blanco	2	54	R. Guajiniquil	5
24	C. De Riego	1	55	Q. Tigra	5
25	R. Piedras	1	56	R. Potrero	4
26	R. Pijije	2	57	R. Pánica	3
27	R. Salto	2	58	R. Cecilia	4
28	R. Liberia	2	59	Q. Honda	2
29	R. Santa Inés	2	60	Q. Piñuela	3
30	R. Colorado	1	61	R. Santa Rosa	1
31	R. Irigaray	1			

Tabla 5-7
Estados de daños en puentes de acuerdo
con la Deformación Permanente del Terreno

Clasificación	Deformación permanente del terreno (PGD)			
	Menor (ds2)	Moderado (ds3)	Extensivo (ds4)	Completo (ds5)
Diseño sismo-resistente	12.5 cm	20 cm	40 cm	60 cm
Diseño convencional	12.5 cm	17.5 cm	30 cm	45 cm

Tabla 5-8: Código y daño esperado en cada puente,
debido a los efectos de licuación del terreno.

Cód.	Nombre del Río	Daño	Cód.	Nombre del Río	Daño
3	R. Agujas	1	41	R. Marote	5
4	R. Tarcolitos	1	42	R. Nandayuri	5
5	R. Grande De Tárcoles	1	43	R. Sardinal	5
6	R. Jesús María	1	47	R. Andamojo	4
8	R. Barranca	1	48	R. Tabaco	4
9	P.S.S R.23	1	51	R. Garza	4
16	R. Abangares	1	52	R. Bejuco	4
20	R. Cañas	1	53	R. Juan De León	4
35	R. Tempisque Nuevo	5	54	R. Guajiniquil	4
36	R. Tempisque Viejo	5	58	R. Cecilia	5
37	R. Belén	5	60	Q. Piñuela	4

Tabla 5-9: Código y daño esperado en cada puente debido a los efectos de aceleración del terreno y licuación.

Cód.	Nombre del Río	Daño	Cód.	Nombre del Río	Daño
1	R. Tulín	1	32	R. Ahogados	2
2	R. La Mona	1	33	R. Azufrado	1
3	R. Agujas	1	34	R. Tempisquito	1
4	R. Tarcolitos	1	35	R. Tempisque Nuevo	5
5	R. Grande De Tárcoles	1	36	R. Tempisque Viejo	5
6	R. Jesús María	1	37	R. Belén	5
7	Estero Mata De Limón	2	38	R. Cañas	4
8	R. Barranca	1	39	R. En Medio	4
9	P.S.S R.23	1	40	R. Diríá	5
10	R. Barranca	2	41	R. Marote	5
11	R. Barranca (Ferroviario)	1	42	R. Nandayuri	5
12	R. Naranjo	2	43	R. Sardinal	5
13	R. Ciruelas	2	44	Q. Toyosa	4
14	R. Seco	2	45	R. Coyolito	4
15	R. Aranjuez	1	46	Q. Lima	4
16	R. Guacimal	2	47	R. Andamojo	4
17	R. Lagarto	2	48	R. Tabaco	4
18	R. Abangares	2	49	R. Cuajiniquil	4
19	R. Higuera	2	50	R. Nosara	4
20	R. Cañas	2	51	R. Garza	5
21	R. Corobicí	2	52	R. Bejuco	5
22	R. Tenorio	1	53	R. Juan De León	5
23	R. Blanco	2	54	R. Guajiniquil	5
24	C. De Riego	1	55	Q. Tigra	5
25	R. Piedras	1	56	R. Potrero	4
26	R. Pijije	2	57	R. Pánica	3
27	R. Salto	2	58	R. Cecilia	5
28	R. Liberia	2	59	Q. Honda	2
29	R. Santa Inés	2	60	Q. Piñuela	4
30	R. Colorado	1	61	R. Santa Rosa	1
31	R. Irigaray	1			