

12130

# **Evaluación del Impacto Ingenieril de un Terremoto en la Península de Nicoya**



## **INFORME FINAL Volumen I**

Preparado por  
**Programa de Ingeniería Sísmica, LANAMME  
Universidad de Costa Rica**  
Coordinador del Proyecto: Ing. Guillermo Santana, Ph.D.

para  
**Comisión Nacional de Emergencias**

Setiembre 1999

# TABLA DE CONTENIDOS

## VOLUMEN I

<b>1.</b>	<b>Descripción del proyecto</b>	1-1
	1.1 Introducción	1-1
	1.2 Beneficiarios	1-1
	1.3 Objetivos	1-1
	1.3.1 Objetivo general	1-1
	1.3.2 Objetivos específicos	1-2
	1.4 Productos	1-2
	1.5 Esquema organizativo	1-2
	1.6 Tareas específicas	1-3
	1.7 Instituciones y personas contactadas	1-5
	1.8 Programa de giras de comprobación de campo	1-7
	1.9 Evaluación de parte del WSSI	1-8
	1.10 Clasificación de instalaciones	1-8
<b>2.</b>	<b>Sistemas de Información Geográfica (SIG)</b>	2-1
	2.1 Definición de un SIG	2-1
	2.2 Ejemplos de aplicaciones de SIG	2-1
	2.3 Paquetes SIG disponibles en el mercado	2-2
	2.4 Atributos y componentes de un SIG	2-3
	2.4.1 Captura de datos	2-3
	2.4.2 Análisis	2-4
	2.4.3 Manipulación	2-6
	2.4.4 Indagación	2-7
	2.4.5 Despliegue y reporte	2-8
	2.5 Características de los datos de un SIG	2-9
	2.6 Estructura de base de datos	2-11
<b>3.</b>	<b>Esquema de Análisis de Amenaza Sísmica</b>	3-1
	3.1 Método general	3-1
	3.2 Tipo de análisis	3-1
	3.3 Modelaje de sismicidad y fallas	3-1
	3.4 Modelaje de la frecuencia sísmica	3-3
	3.5 Modelaje del movimiento del suelo	3-3
	3.6 Estimación de la Amenaza en Sitio	3-4
	3.7 Análisis de incertidumbre	3-6
	3.8 Efectos locales del sitio	3-6
	3.9 Amenazas colaterales	3-8

<b>4.</b>	<b>Determinación de la Amenaza Sísmica mediante SIG</b>	<b>4-1</b>
4.1	Datos digitales requerido	4-1
4.2	Modelaje del movimiento del suelo	4-1
4.2.1	Análisis probabilístico	4-1
4.2.2	Análisis determinístico	4-2
4.3	Efectos locales del sitio	4-3
4.3.1	Modificación del movimiento del suelo	4-3
4.3.2	Licuefacción	4-4
4.3.3	Deslizamientos	4-5
4.3.4	Ruptura del suelo	4-5
4.4	Amenazas colaterales	4-6
4.4.1	Inundación	4-6
4.4.2	Incendios debidos a sismo	4-7
<b>5.</b>	<b>Referencias y figuras</b>	<b>5-1</b>
<b>6.</b>	<b>Ilustraciones</b>	<b>6-1</b>
<b>7.</b>	<b>Anexos. Fórmulas de investigación de campo.</b>	<b>7-1</b>

## **VOLUMEN II**

<b>1.</b>	<b>Generalidades</b>	<b>1-1</b>
1.1	Introducción	1-1
1.2	Objetivos	1-2
1.2.1	Objetivo general	1-2
1.2.2	Objetivos específicos	1-2
1.3	Alcance	1-3
1.4	Antecedentes	1-3
<b>2.</b>	<b>Aspectos teóricos</b>	<b>2-1</b>
2.1	Consideraciones sobre ingeniería sísmica	2-1
2.1.1	Tectónico global y origen de los terremotos	2-1
2.1.2	Transmisión de la energía sísmica	2-2
2.1.3	Características principales de los sismos	2-3
2.1.3.1	Magnitud del sismo	2-3
2.1.3.2	Foco y epicentro	2-5
2.1.3.3	Intensidad	2-5
2.1.3.4	Momento Sísmico	2-6

2.1.3.5 Energía Sísmica	2-6
2.2 Sistemas de Información Geográfica	2-6
2.2.1 Definición y características	2-6
2.2.2 Atributos de un SIG	2-7
2.2.2.1 Captura de datos	2-7
2.2.2.2 Análisis	2-7
2.2.2.3 Manipulación	2-8
2.2.2.4 Selección	2-9
2.2.2.5 Despliegue	2-9
<b>3. Distribución de la aceleración del sismo de Nicoya</b>	<b>3-1</b>
3.1 Ubicación y características del sismo	3-1
3.2 Propagación de la onda sísmica	3-2
3.3 Distribución de la aceleración pico para el sismo de Nicoya	3-5
<b>4. Evaluación de daños en carreteras</b>	<b>4-1</b>
4.1 Licuación	4-1
4.1.1 Probabilidad de licuación	4-3
4.1.2 Zonas con probabilidad de licuación	4-4
4.1.3 Deformación permanente del suelo por licuación	4-5
4.1.4 Deformaciones en la zona de Guanacaste	4-6
4.2 Deslizamientos	4-6
4.2.1 Desplazamientos permanentes del terreno por deslizamiento	4-7
4.2.2 Determinación de deformaciones en la zona de Guanacaste	4-8
4.3 Determinación de daños en carreteras	4-8
4.4 Daños esperados en las carreteras de Guanacaste	4-10
<b>5. Determinación de daños en puentes</b>	<b>5-1</b>
5.1 Metodología de análisis de daños	5-1
5.2 Otros enfoques existentes	5-1
5.3 Descripción del método del “Risk Management Solutions, Inc”	5-3
5.3.1 Clasificación de puentes	5-4
5.3.2 Definición de los estados de daños	5-5
5.3.3 Funciones de daños en puentes	5-5
5.4 Revisión de la metodología para el sismo de Limón	5-6
5.5 Daños causados por el efecto de la aceleración	5-7
5.6 Daños esperados debido a la licuación	5-8
5.7 Daños ocasionados por la combinación de efecto de la aceleración y la licuación	5-9
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>6-1</b>

6.1 Conclusiones	6-1
6.2 Recomendaciones	6-2
<b>7. Referencias</b>	<b>7-1</b>
<b>Anexo A:</b> Relaciones de atenuación	<b>A-1</b>
<b>Anexo B:</b> Mapas de aceleración, geología y pendientes	<b>B-1</b>
<b>Anexo C:</b> Estratigrafía de Guanacaste	<b>C-1</b>
<b>Anexo D:</b> Curvas de fragilidad	<b>D-1</b>
<b>Anexo E:</b> Clasificación, daños calculados y daños observados observados para los principales puentes de la zona de Limón	<b>E-1</b>
<b>Anexo F:</b> Clasificación, descripción y daños esperados para los puentes de Guanacaste.	<b>F-1</b>
<b>Anexo G:</b> Definición y componentes de los puentes	<b>G-1</b>
 <b><u>VOLUMEN III</u></b>	
<b>1. Generalidades</b>	<b>1-1</b>
1.1 Introducción	1-1
1.2 Objetivos	1-3
1.2.1 Objetivo general	1-3
1.2.2 Objetivos específicos	1-3
1.3 Alcance del proyecto	1-4
1.4 Antecedentes teórico y/o prácticos del problema	1-5
<b>2. Antecedentes</b>	<b>2-1</b>
2.1 Aspectos Generales sobre desastres naturales	2-1
2.1.1 Efectos de los desastres	2-1
2.1.2 Definiciones	2-2
2.1.3 Amenaza y Riesgo Sísmico	2-3
2.2 Peligros Geológicos	2-4
2.2.1 Visión general del proceso de la planificación para el desarrollo	2-4

2.2.2 Terremotos	2-5
<b>3. La Zona de Estudio</b>	<b>3-1</b>
3.1 Delimitación	3-1
3.2 Historia Sísmica	3-3
<b>4. Metodología para la Estimación de Daño para Edificios en General</b>	<b>4-1</b>
4.1 Descripción de la metodología	4-1
4.1.1 Datos de Entrada Requeridos para el Análisis	4-2
4.1.2 Funciones de Daño	4-2
4.2 Descripción de los tipos de modelos para edificios	4-5
4.2.1 Sistemas Estructurales	4-6
4.3 Daño Estructural	4-9
4.4 Daño en edificios debido al movimiento del terreno	4-18
4.4.1 Generalidades	4-18
4.4.2 Curvas de Capacidad	4-18
4.4.3 Curvas de Fragilidad	4-20
4.4.4 Curvas de Fragilidad Estructural para PGA	4-21
4.5 Daño en Edificios debido a falla del terreno	4-21
4.5.1 Generalidades	4-21
4.5.2 Curvas de Fragilidad–Desplazamiento permanente del terreno	4-21
4.5.3 Asentamiento del terreno	4-23
<b>5. Distribución de la Aceleración Pico en la Zona en Estudio</b>	<b>5-1</b>
5.1 Generalidades	5-1
5.2 Relaciones de atenuación de Youngs et al	5-1
<b>6. Caracterización de las Estructuras de los Centros Educativos y de Salud</b>	<b>6-1</b>
6.1 Problemas de configuración en las edificaciones	6-1
6.1.1 Longitud	6-2
6.1.2 Flexibilidad	6-3
6.1.3 Falta de Redundancia	6-3
6.1.4 Torsión	6-4
6.1.5 Flexibilidad del diafragma	6-5
6.1.6 Concentración de esfuerzo en planta	6-6
6.1.7 Concentración de masa	6-6
6.1.8 Columnas débiles	6-7
6.1.9 Pisos débiles	6-7

6.2 Infraestructura de los Centros Educativos	6-8
6.2.1 Aspectos generales	6-8
6.2.2 Centros Educativos en estudio	6-9
6.3 Infraestructura de los Centros de Salud	6-15
6.3.1 Aspectos generales	6-15
6.3.2 Centros de Salud en estudio	6-15
6.4 Descripción de las estructuras analizadas	6-18
<b>7. Daños en los Centro Educativos y de Salud</b>	<b>7-1</b>
7.1 Aspectos generales	7-1
7.2 Descripción de daños de las estructuras considerando el PGA	7-2
7.2.1 Daños esperados para los Centros Educativos	7-2
7.2.2 Descripción de daños en Centros de Salud	7-7
7.3 Daños por deslizamiento del terreno	7-10
7.4 Daños por licuación en las estructuras	7-10
7.5 Daños esperados en las estructuras de los centros educativos y de salud	4-10
<b>8. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>8-1</b>
8.1 Conclusiones	8-1
8.2 Recomendaciones	8-6
<b>9. Referencias Bibliográficas</b>	<b>9-1</b>
<b>Anexo A:</b>	
Matriculas en escuela de la zona en estudio	A-1
Colegios de la zona de estudio	A-20
<b>Anexo B: Escuelas y clínicas evaluadas en el estudio</b>	
Escuelas de Puntarenas	B-1
Escuelas de Guanacaste	B-12
Colegios de Puntarenas	B-37
Colegios de Guanacaste	B-51
Clínicas de Puntarenas	B-79
Clínicas de Guanacaste	B-86

**VOLUMEN IV**

<b>1. Introducción</b>	1-1
1.1 Justificación	1-1
1.2 Objetivos	1-4
1.3 Ubicación del área de estudio	1-5
1.4 Metodología	1-6
<b>2. Marco geológico</b>	2-1
2.1 Antecedentes sobre el origen y emplazamiento del Complejo de Nicoya y la cobertura sedimentaria	2-1
2.2 Estratigrafía Regional	2-4
2.2.1 Complejo de Nicoya	2-5
2.2.2 Formación Sabana Grande	2-6
2.2.3 Formación Conglomerado Barbudal	2-6
2.2.4 Formación Rivas o Curú	2-7
2.2.5 Rocas clásticas y bioclásticas	2-8
2.2.5.1 Formación Barra Honda	2-8
2.2.5.2 Formación Brito	2-8
2.2.6 Formación Masachapa	2-9
2.2.7 Rocas volcánicas	2-9
2.2.7.1 Formación Bagaces	2-10
2.2.7.2 Formación Liberia	2-10
2.2.8 Manglares y Pantanos	2-11
2.2.9 Depósitos Recientes	2-11
2.3 Aspectos geomorfológicos y neotectónicos	2-14
2.3.1 Consideraciones generales	2-14
2.3.2 Formas de origen volcánico denudacional	2-16
2.3.2.1 Serranías de la Península de Nicoya	2-16
2.3.2.2 Meseta volcánica de Santa Rosa	2-17
2.3.3 Formas de origen sedimentario denudacional	2-17
2.3.4 Formas de origen fluvial	2-18
2.3.5 Consideraciones sobre Neotectónica	2-18
2.4 Aspectos de geología estructural	2-20
<b>3. Aspectos sísmológicos</b>	3-1
3.1 Sismotectónica	3-1
3.2 Sísmicidad en la región del Pacífico norte de Costa Rica	3-10
<b>4. Generalidades sobre amplificación de la señal sísmica en el subsuelo</b>	4-1



4.1	Introducción	4-1
4.2	Características del movimiento sísmico del terreno	4-2
4.2.1	Parámetros de amplitud	4-2
4.2.2	Parámetros de contenido de frecuencias	4-4
4.2.2.1	Espectro del movimiento sísmico del terreno	4-5
4.2.2.2	Parámetros espectrales	4-7
4.2.2.3	Razón $v_{m\acute{a}x}/a_{m\acute{a}x}$	4-8
4.2.3	Duración	4-8
4.2.4	Discusión	4-9
4.3	Factores que afectan el movimiento sísmico del terreno	4-10
4.4	Influencia de las condiciones del suelo en las características del movimiento sísmico del terreno	4-12
<b>5.</b>	<b>Programa de análisis de respuesta sísmica del terreno</b>	<b>5-1</b>
5.1	Limitaciones que presenta el programa SHAKE (NORAD-CEPREDENAC, 1997)	5-1
5.2	Modelo matemático del SHAKE	5-2
5.3	El efecto de las propiedades del semi-espacio elástico	5-7
5.4	Transformada de Fourier	5-8
5.5	Comportamiento no lineal del suelo	5-9
5.6	Método lineal equivalente	5-9
5.7	Método de solución exacta	5-11
<b>6.</b>	<b>Análisis de la información obtenida</b>	<b>6-1</b>
6.1	Mapa geológico	6-1
6.2	Mapa tipos de suelos	6-2
6.3	Mapa geológico y sondeos geofísicos	6-4
6.4	Determinación de los parámetros geofísicos del suelo y roca a utilizar en el análisis	6-9
<b>7.</b>	<b>Resultados del programa de análisis de respuesta sísmica terreno</b>	<b>7-1</b>
7.1	Movimientos sísmicos de entrada y su influencia en la amplificación sísmica	7-1
7.2	Resultados generales del programa	7-3
7.3	Métodos espectrales y funciones de transferencia	7-4
7.4	Espectros de respuesta propuestos y funciones de transferencia	7-5
7.5	Resultados generales de los tres grupos de pozos estudiados	7-29
7.6	Espectros de diseño propuestos	7-33
7.7	Limitaciones	7-40
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>8-1</b>

---

8.1 Conclusiones	8-1
8.2 Recomendaciones	8-5
<b>9. Bibliografía</b>	9-1
<b><u>ANEXO 1</u></b> Información general de los movimientos sísmicos utilizados	A1
<b><u>ANEXO 2</u></b> Perfiles geológicos de los pozos utilizados en los tres grupos de estudio y resultados del programa	A2-1
• Primer grupo de estudio	A2-2
• Segundo grupo de estudio	A2-3
• Tercer grupo de estudio	A2-4
• Grupo A	A2-5
• Grupo B	A2-6

**VOLUMEN V**

<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	1-1
	1.1 Justificación	1-1
	1.2 Objetivos	1-2
	1.3 Alcance y limitaciones	1-2
	1.4 Metodología	1-3
<b>2.</b>	<b>Vulnerabilidad sísmica y tipos de daños en puentes</b>	2-1
	2.1 Generalidades	2-1
	2.2 Tipos de daños en puentes debidos a terremotos	2-1
	2.2.1 Desplazamientos	2-1
	2.2.2 Daños en columnas	2-4
	2.2.3 Fallas en las uniones	2-5
	2.2.4 Falla en las fundaciones	2-5
<b>3.</b>	<b>Estimación de la demanda sísmica</b>	3-1
	3.1 Antecedentes	3-1
	3.2 Medición de los sismos	3-1
	3.3 Atenuación de la aceleración del terreno	3-3
	3.4 Aplicación de las relaciones de atenuación al terremoto de Nicoya	3-5
	3.5 Determinación del espectro de respuesta para el análisis	3-7
<b>4.</b>	<b>Descripción de la estructura</b>	4-1
	4.1 Localización	4-1
	4.2 Generalidades	4-1
	4.3 Especificaciones	4-1
	4.3.1 Diseño y construcción	4-1
	4.3.2 Materiales	4-2
	4.3.2.1 Concreto	4-2
	4.3.2.2 Acero de refuerzo	4-2
	4.4 Descripción de la superestructura	4-2
	4.4.1 Tramo de vigas de concreto postensado	4-2
	4.4.2 Tramo de vigas tipo canaleta	4-3
	4.5 Descripción de la subestructura	4-3
	4.5.1 Bastiones	4-4
	4.5.2 Pila	4-4
	4.6 Apoyos y conexiones	4-4
	4.6.1 Claros de vigas tipo I postensadas	4-5
	4.6.2 Claro de vigas pretensadas tipo canaleta	4-5

<b>5.</b>	<b>Consideraciones acerca del modelo y método de análisis</b>	5-1
5.1	Descripción del programa SEISAB	5-1
5.1.1	Introducción	5-1
5.1.2	Características del modelo generado	5-1
5.1.3	Métodos de análisis	5-3
5.1.4	Combinación de respuestas modales	5-3
5.1.5	Combinaciones de carga	5-4
5.2	Modelo de la superestructura	5-4
5.3	Modelo de la pila	5-5
5.4	Modelo de bastiones y fundaciones	5-6
5.4.1	Efecto del suelo en placas aisladas	5-6
5.4.2	Efecto del suelo en los bastiones	5-9
<b>6.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	6-1
6.1	Discusión acerca del modelo utilizado	6-1
6.2	Caracterización modal	6-2
6.3	Revisión de desplazamientos	6-3
6.3.1	Desplazamientos en los bastiones	6-3
6.3.2	Desplazamientos en las conexiones pila-superestructura	6-5
6.4	Revisión de la columna de la pila	6-6
6.4.1	Flexocompresión	6-6
6.4.2	Cortante	6-8
6.5	Revisión de la placa de fundación de la pila	6-9
6.6	Revisión de conexiones	6-11
6.6.1	Llaves de cortante	6-11
6.6.2	Dovelas	6-11
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	7-1
7.1	Conclusiones	7-1
7.2	Recomendaciones	7-4
<b>8.</b>	<b>Referencias</b>	8-1
<b>Anexo A:</b>	<b>Detalles constructivos para los componentes principales del puente sobre el Río Nosara.</b>	A-1
<b>Anexo B:</b>	<b>Diagramas para la estimación de <math>\alpha</math> y <math>\beta</math></b>	B-1

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Ejemplo de enlace de datos dentro del ambiente SIG.	5-5
<b>Figura 1.2</b> Tres tipos de estructuras de datos.	5-6
<b>Figura 2.1</b> Pasos de un análisis probabilístico de amenaza sísmica.	5-7
<b>Figura 2.2</b> Tipos de fallas.	5-8
<b>Figura 2.3</b> Ejemplo de relaciones de recurrencia.	5-9
<b>Figura 2.4</b> Ejemplos de acelerogramas registrados.	5-10
<b>Figura 2.5</b> Diferentes definiciones de distancia de la fuente al sitio.	5-11
<b>Figura 2.6</b> Ejemplo de funciones de atenuación para aceleración pico horizontal vrs. Distancia para $M=5.5, 6.5$ .	5-11
<b>Figura 2.7</b> Ejemplo de curvas de amenaza para una localidad.	5-12
<b>Figura 2.8</b> Representación de árbol lógico para incertidumbre.	5-13
<b>Figura 2-9</b> Tipos de Sitios según la Amplificación Sísmica en los Suelos.	5-14
<b>Figura 2.10</b> Valores para el exponente de amplificación sísmica $m_T$	5-14
<b>Figura 2.11</b> Índice de severidad de licuefacción y curvas de mejor ajuste para varios terremotos norteamericanos .	5-15
<b>Figura 2.12</b> Modelos típicos de falla superficial.	5-16
<b>Figura 3.1</b> Modelaje del movimiento del suelo en SIG vectorial.	5-17
<b>Figura 4.1</b> Ejemplo simplificado de tablas interrelacionadas en un inventario de instalaciones.	5-18
<b>Figura 4.2</b> Ejemplo de tablas de bases de datos interrelacionadas	5-19
<b>Figura 4.3</b> Ejemplo de reglas de inferencia y procesos de geocodificación	5-20
<b>Figura 5.1</b> Matriz de Probabilidades de Daño para estructuras de marcos de acero de poca altura	5-21

<b>Figura 5.2</b>	Tasa de daño medio como una función de la Intensidad de Mercalli Modificada para viviendas de madera en San Francisco, California.	5-21
<b>Figura 5.3</b>	Curvas de fragilidad para estructuras bajas a base de muros de concreto.	5-22
<b>Figura 5.4</b>	Desarrollo de relaciones heurísticas de daño por movimiento.	5-23
<b>Figura 5.5</b>	Distribución de daños para edificios de manpostería como funciones de MMI con bandas de incertidumbre.	5-24
<b>Figura 5.6</b>	Enfoque general para el desarrollo de funciones analíticas de Fragilidad.	5-24
<b>Figura 5.7</b>	Curvas analíticas de fragilidad para edificios a base de marcos de concreto.	5-25
<b>Figura 5.8a</b>	Curvas de fragilidad para componentes no-estructurales en edificios a base de muros de concreto de mediana altura.	5-26
<b>Figura 5.8b</b>	Curvas de fragilidad para componentes no-estructurales en edificios de cortante de mediana altura.	5-26
<b>Figura 5.9</b>	Tasa de reparación para tuberías frágiles después de un terremoto.	5-27
<b>Figura 5.10</b>	Ejemplo de análisis de red para la conectividad del sistema de transporte con diferentes colapsos de puentes.	5-28
<b>Figura 5.11</b>	Factor de Daño Medio para diferentes valores de desplazamiento Diferenciales de Falla	5-28
<b>Figura 5.12</b>	Curvas de fragilidad para varios estados de daño para puentes diseñados convencionalmente, sujetos a deformaciones permanentes del suelo.	5-29
<b>Figura 5.13</b>	Curva de restauración de funcionalidad para residencias en Nivel de Daño 4.	5-30
<b>Figura 5.14</b>	Escala de clasificación de lesiones.	5-31
<b>Figura 5.15</b>	Tasas de lesión y mortalidad.	5-31
<b>Figura 5.16</b>	Tasa de víctimas para diferentes clases de edificaciones en estado de daño moderado.	5-33

<b>Figura 6.1</b> Esquema de almacenamiento para datos de el movimiento vs. daño.	5-34
<b>Figura 6.2</b> Ejemplo de cálculo de daño mediante SIG.	5-35
<b>Figura 6.3</b> Ejemplo de cálculo de daño por licuefacción usando SIG.	5-36
<b>Figura 6.4</b> Muestra de costos de construcción.	5-37
<b>Figura 6.5</b> Ejemplo de estimación de pérdida directa para edificios.	5-38
<b>Figura 6.6</b> Ejemplo de estimación de pérdida indirecta para edificios.	5-39

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Puente mixto concreto-acero sobre la quebrada Pánica, provincia de Puntarenas.	6-2
<b>Ilustración 2.</b> Vista aérea de la Ruta Nacional 1, Liberia.	6-2
<b>Ilustración 3.</b> Vista aérea de los accesos del futuro puente sobre el río Tempisque.	6-3
<b>Ilustración 4.</b> Hoteles y marina del desarrollo turístico de Flamingo.	6-3
<b>Ilustración 5.</b> Vista aérea de la ciudad de Liberia.	6-4
<b>Ilustración 6.</b> Puente sobre la quebrada La Tigra, colapso por inundaciones.	6-4