

# **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. 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. 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. 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>	4-1
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>	5-1
<b>6.</b>	<b>Ilustraciones</b>	6-1
<b>7.</b>	<b>Anexos. Fórmulas de investigación de campo.</b>	7-1

## **VOLUMEN II**

<b>1.</b>	<b>Generalidades</b>	1-1
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>	2-1
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>	7-1
<b>Anexo A:</b> Relaciones de atenuación	A-1
<b>Anexo B:</b> Mapas de aceleración, geología y pendientes	B-1
<b>Anexo C:</b> Estratigrafía de Guanacaste	C-1
<b>Anexo D:</b> Curvas de fragilidad	D-1
<b>Anexo E:</b> Clasificación, daños calculados y daños observados observados para los principales puentes de la zona de Limón	E-1
<b>Anexo F:</b> Clasificación, descripción y daños esperados para los puentes de Guanacaste.	F-1
<b>Anexo G:</b> Definición y componentes de los puentes	G-1

### **VOLUMEN III**

<b>1. Generalidades</b>	1-1
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>	2-1
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 sismológicos</b>	3-1
3.1 Sismotectónica	3-1
3.2 Sismicidad 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. 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. 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. 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. 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 $m_{TI}$ .	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 mampostería 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

## Capítulo 1

### Descripción del proyecto

#### 1.1 Introducción

El proyecto consiste en llevar a cabo un Análisis de Riesgo Sísmico (ARS) determinístico cuyo resultado sirva como instrumento de apoyo en la toma de decisiones para la planificación de las políticas de reforzamiento estructural de la red vial y de los componentes críticos de la infraestructura regional, así como también para el manejo de la emergencia generada por la ocurrencia del terremoto máximo creíble en la Península de Nicoya. La región de estudio comprende la totalidad de la provincia de Guanacaste y la parte de la provincia de Puntarenas ubicada en la mencionada península.

Un elemento clave para este trabajo es el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (SIG), compuesto de varios módulos que contienen los datos y los modelos necesarios para implementar cada uno de los pasos del ARS.

Este procedimiento de ARS tiene varias características convenientes. La primera de ellas es que se llevará a cabo dentro del marco de un SIG, lo cual mejorará el manejo de la información, la eficiencia en el análisis y la presentación de resultados. La segunda es que el SIG será modular lo cual facilitará la incorporación de nuevos datos, nuevos procedimientos y nuevos modelos conforme éstos vayan siendo desarrollados en el futuro.

Esta gama de resultados brindaría utilidad al ARS como instrumento para la planificación, la priorización y el establecimiento de criterios, para el reforzamiento sísmico de la infraestructura existente en la región.

#### 1.2 Beneficiarios

Los principales beneficiarios del trabajo propuesto serán la Comisión Nacional de Emergencia, los gobiernos municipales y provinciales de la región Chorotega y los Ministerios de Obras Públicas y Transporte, de Turismo y de Salud. Esto por cuanto el sistema a establecer proveerá los instrumentos necesarios para la planificación y organización de acciones de prevención y mitigación a tomar ante la ocurrencia de un terremoto de magnitud 7,5 en la Península de Nicoya mediante la escenificación del impacto del sismo sobre la infraestructura de la región.

#### 1.3 Objetivos

##### 1.3.1 Objetivo general

Proveer a la CNE y a las autoridades pertinentes de los gobiernos locales, provinciales y el nacional con los instrumentos necesarios para la planificación y organización de acciones de

prevención y mitigación a tomar, ante la ocurrencia de un terremoto de subducción de magnitud 7,5 en la Península de Nicoya mediante la escenificación del impacto del sismo sobre la infraestructura de la región. Este objetivo se logrará mediante la implementación de un sistema computarizado de Análisis de Riesgo Sísmico basado en un Sistema de Información Geográfica.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar la vulnerabilidad sísmica de la red vial de la región, esto es, las carreteras nacionales y regionales.
- Estudiar el potencial de amenazas colaterales como licuación y fallas del suelo en los principales centros de población.
- Determinar las características sismo-resistentes de los todos los puentes existentes en la región, de acuerdo a su importancia.
- Estudiar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de importancia primaria, tales como hospitales y clínicas; estaciones de policía, bomberos y Cruz Roja; escuelas primarias y secundarias; iglesias; aeropuertos y campos de aterrizaje.
- Estudiar la vulnerabilidad sísmica de líneas vitales tales como represas; canales de riego; líneas de conducción eléctrica de alta tensión y red de subestaciones eléctricas.

### 1.4 Productos

- Simulación del impacto del terremoto máximo creíble a ocurrir en la región de estudio mediante el uso del Sistema de Información Geográfica preparado para tal efecto y con capacidad para realizar el análisis determinístico del riesgo sísmico.
- Base de datos computarizada conteniendo la información ingenieril completa de todos las carreteras y puentes integrados en la red vial de la región de estudio.
- Base de datos computarizada conteniendo la información ingenieril completa de todas las instalaciones determinadas como críticas para la atención de la emergencia sísmica y descritas anteriormente, i.e., hospitales, aeropuertos, escuelas etc.

### 1.5 Esquema organizativo

El patrocinio de la Comisión Nacional de Emergencia está coordinado y dirigido por el Ing. Jorge Arturo Castro; el trabajo del proyecto está coordinado por el Ing. Guillermo Santana, Ph.D., del LANAMME. El esquema organizativo completo se presenta en el cuadro 1.1 . En este se dan los nombres de cada uno de los individuos participantes y sus respectivas funciones. El proyecto se lleva a cabo mediante un convenio entre la Comisión Nacional de Emergencia y la Fundación para la Investigación de la Universidad de Costa Rica (FUNDEVI). Las funciones administrativas se llevan a cabo en el LANAMME y en coordinación con

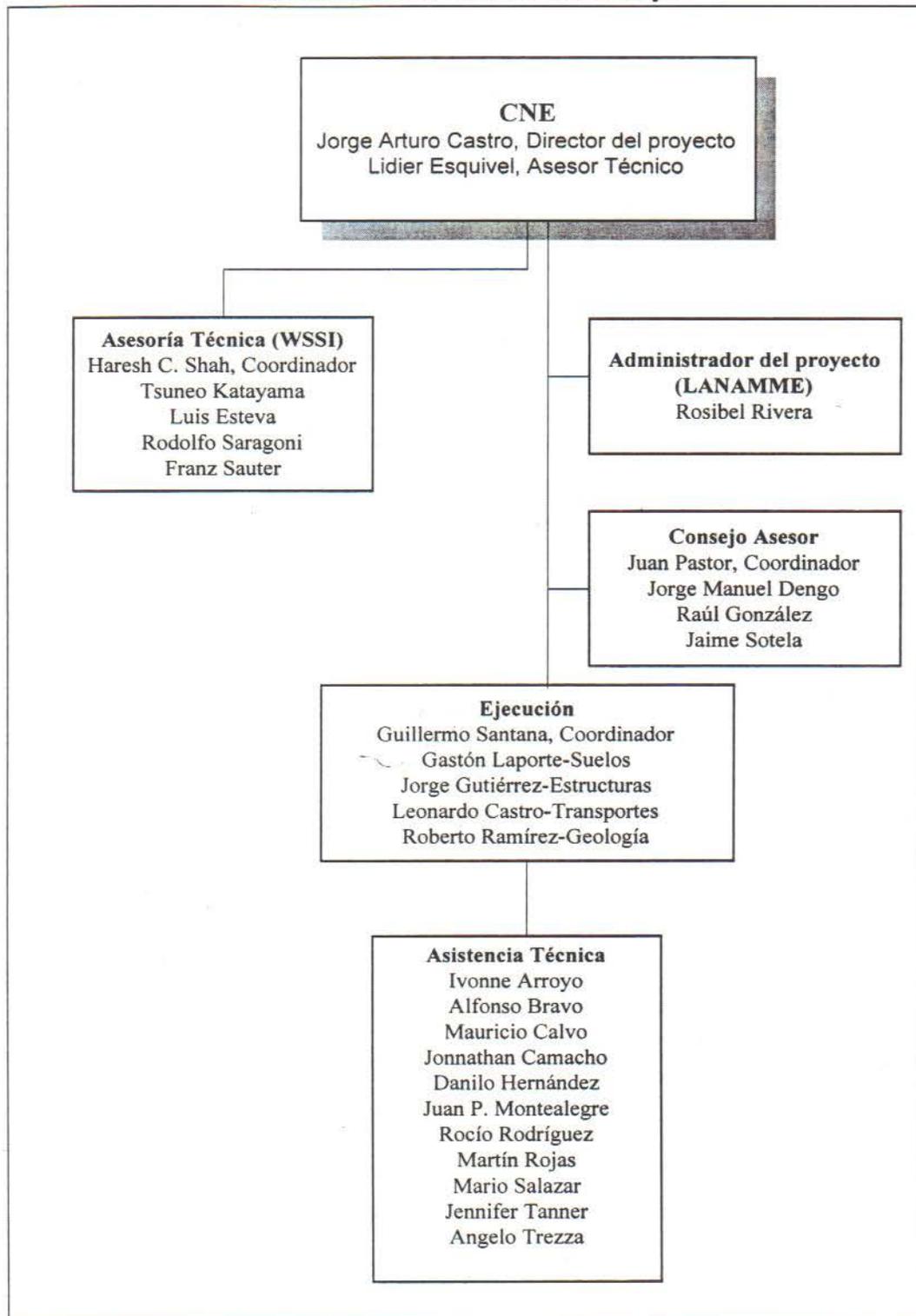
FUNDEVI. Además el proyecto cuenta con una auditoría técnica externa de parte de la Iniciativa Mundial de Seguridad Sísmica, *World Seismic Safety Initiative* (WSSI).

### 1.6 Tareas específicas

Durante la primera fase del proyecto se han concluido las siguientes tareas: estudio preliminar de la zona; revisión de los estudios existentes; digitalización y clasificación de mapas; inspección de la zona de estudio; recolección de características de puentes y carreteras; creación de la base de datos espacial (SIG); determinación preliminar del riesgo sísmico (ARS); redacción de informes de avance. La creación de la base de datos espacial (SIG) y la determinación preliminar del riesgo sísmico (ARS) conllevó la redacción de un reporte de fondo que se incluye en el presente informe. Este informe representa, a la fecha, la única referencia conocida y escrita en español que incluye tanto los elementos básicos referentes a los sistemas de información geográfica como los elementos básicos de la determinación del riesgo sísmico mediante esta nueva tecnología. En resumen, las tareas específicas son las siguientes:

- Resumir el conocimiento vigente y nuevos conocimientos en la generación de Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Evaluar datos para identificar necesidad de información específica para desarrollar y verificar el SIG.
- Generar la información necesaria a través de investigación de fuentes, visitas de campo, inferencias.
- Construcción de bases de datos para el SIG.
- Modelaje del sismo mediante la incorporación de los datos geológicos, sismológicos, etc. en el SIG para generar mapas de intensidades, aceleraciones, etc.

**Cuadro 1.1 : Esquema organizativo del proyecto Impacto Ingenieril de un Terremoto en la Península de Nicoya.**



### 1.7 Instituciones y personas contactadas

Una parte considerable del tiempo utilizado se ha dedicado a la obtención de datos generados por diversas instituciones nacionales e internacionales. Esta tarea ha sido bastante fructífera dado que se han identificado personas interesadas en ayudar a la realización del proyecto.

A continuación se presenta una lista de las instituciones y personas contactadas en cada institución:

#### **-Ministerio de Obras Públicas y Transportes**

Dirección General de Planificación

*Ing. María Lorena López, Directora*

*Gerardo Pezoa*

*Miguel Cubero*

*Ana Lorena Segura*

*José Fonseca*

Dirección de Aviación Civil

Departamento de Infraestructura Aeronáutica

*Ing. Enrique Molina, Director*

*Arq. Ana Beatriz López*

*Miguel Ramírez*

Instituto Geográfico Nacional

*Geógrafo Eduardo Bedoya B., Director*

*Geógrafo Cristián Asch*

Departamento Diseño de Puentes

*Ing. José Rivera, Director*

*Ing. María Ramírez*

Departamento de Geotecnia y Materiales

*Geólogo Elmer Jiménez*

#### **-Caja Costarricense del Seguro Social**

Proyecto de Modernización, CCSS

*Dr. Luis Bernardo Sáenz, Director*

Departamento de Planificación

*Marielos Benavides*

*Luis Víquez*

#### **-Ministerio de Seguridad Pública**

*Lic. Laura Chinchilla, Ministra*

#### **-Ing. Jorge Manuel Dengo Obregón**

**Ex Vice Presidente de la República**

#### **-Ministerio de Educación Pública**

Centro Nacional de Infraestructura Física Educativa (CENIFE)

*Arq. Fernando Ulloa, Director Ejecutivo*  
*Juan de Dios Arce*  
*Roxana Campos*

**- Ministerio de Economía, Industria y Comercio**

Departamento de Estadística y Censos

**-Universidad Nacional**

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica

*Dr. Jorge Marino Protti*

*Dr. Federico Güendel*

**-Universidad de Costa Rica**

PRODUS

*Dr. Rosendo Pujol Mesalles, Director*

*Ing. Alexander González*

CIEDES

*Dr. Carlos Quesada Mateo, Director*

**-SENARA**

Departamento de Geología

*Geóloga Sandra Arroyo, Directora*

**-Stanford University, California, USA**

Department of Civil Engineering

*Dr. Haresh C. Shah*

*Dra. Stephanie A. King*

*Dra. Anne Kiremidjian*

**-University of California at Berkeley, California, USA**

Earthquake Engineering Research Center

*Prof. Jack P. Moehle, Director*

*Cecily Sobey, Librarian*

**-Risk Management Solutions, Inc. Menlo Park, California, USA**

Government Services Group

*Dr. R. Scott Lawson, Director*

**-Consiglio Nazionale delle Ricerche**

*Dr. Sergio Chiesa*

**-Federal Emergency Management**

*Gil Jamieson, Chief of Risk Assesment at the Mitigation Directorate*

**-Risk Engineering, Inc.**

*Dr. Robin McGuire, President*

El resultado parcial de la colección de información se puede ver a través de la siguiente lista de mapas que han sido digitalizados:

**Curvas de nivel para Costa Rica.** Intervalos de 100 metros. Escala de digitalización 1:200 000. Fuente: *Ministerio de Agricultura y Ganadería con colaboración holandesa.*

**Carreteras Nacionales y Regionales.** Escala de digitalización 1:50 000. Fuente: *Ministerio de Obras Públicas y Transportes con colaboración de la agencia alemana GTZ.*

**Geológico.** Escala de digitalización 1:200 000. Fuente: *PRODUS*

**Ríos.** Escala de digitalización 1:200 000. Fuente: *Agencia alemana de cooperación GTZ*

**Tipos de suelos.** Escala de digitalización 1:200 000. Fuente: *PRODUS*

**Distritos de Costa Rica.** Escala de digitalización 1:50 000. Fuente: *PRODUS*

**Provincias de Costa Rica.** Escala de digitalización 1:50 000. Fuente: *PRODUS*

**Geomorfológico del Pacífico Norte de Costa Rica.** Escala de digitalización 1:100000. Fuente: *Universidad de Costa Rica en colaboración con el Servicio de Cooperación Cultural y Técnica del Gobierno de Francia.*

### **1.8 Programa de giras de comprobación de campo**

A través del Ministerio de Obras Públicas y Transportes y el Ministerio de Educación Pública se han obtenido los bancos de datos de mantenimiento de puentes y ubicación de escuelas y colegios para la región de estudio. Este banco de datos contiene toda la información referente a las características geométricas y de materiales de los puentes. Sin embargo, con el objetivo de verificar el grado de actualización de los datos, se ha procedido a realizar una serie de giras de campo a la Península de Nicoya. Para recabar la información de campo, se diseñaron y calibraron formularios de encuesta que se presentan en el anexo. Además se realizó una gira en helicóptero sobre toda la región, en especial la zona costera de más difícil acceso por vía terrestre.

## 1.9 Evaluación de parte del WSSI

Durante el mes de marzo de 1997, se llevó a cabo la evaluación inicial del proyecto por parte del equipo integrado para tal efecto por la Iniciativa Mundial de Seguridad Sísmica, *World Seismic Safety Initiative* (WSSI). Las reuniones se prolongaron por un lapso de 3 días. Para la reunión inicial se contó con la presencia de todos los participantes del proyecto, quienes dieron valiosos aportes en cuanto a la marcha del proyecto. Se adjunta el resultado de la evaluación como anexo al presente volumen.

## 1.10 Clasificación de instalaciones

Esta clasificación se adaptó de la evaluación de daños por sismo en California según el ATC-13, 1985.

### Edificios

- Madera (bajos)
- Metal liviano (bajos)
- Mampostería sin refuerzo (muro periférico)
  - a. Bajos (uno a tres pisos)
  - b. Medianos (cuatro a siete pisos)
- Mampostería sin reforzar (con muro de carga)
  - a. Bajos
  - b. Medianos
  - c. Altos (más de ocho pisos)
- Muro de corte de concreto reforzado (con marcos rígidos)
  - a. Bajos
  - b. Medianos
  - c. Altos
- Muro de corte de concreto reforzado (sin marcos rígidos)
  - a. Bajos
  - b. Medianos
  - c. Altos
- Muro de corte de mampostería reforzada (con marcos rígidos)
  - a. Bajos
  - b. Medianos
  - c. Altos
- Marcos de acero arriostrados
  - a. Bajos
  - b. Medianos
  - c. Altos
- Marcos rígidos de acero (sistema de marco perimetral)
  - a. Bajos
  - b. Medianos

- c. Altos
- Marcos rígidos de acero (sistema de marco distribuido)
  - a. Bajos
  - b. Medianos
  - c. Altos
- Marcos dúctiles de concreto reforzado (sistema de marco distribuido)
  - a. Bajos
  - b. Medianos
  - c. Altos
- Marcos no-dúctiles de concreto reforzado (sistema de marco distribuido)
  - a. Bajos
  - b. Medianos
  - c. Altos
- Concreto prefabricado (no incluye *tilt up*)
  - a. Bajos
  - b. Medianos
  - c. Altos
- De gran luz (de baja altura)
- *Tilt up* (bajos)
- Casas móviles

### **Puentes**

- Convencionales (menos de 150 m. de claro)
  - a. Claros simples múltiples
  - b. Continuos/monolíticos (incluye los puentes de un solo claro)
- Mayores (mas de 150 m. de claro)

### **Tuberías**

- Subterráneas
- Superficiales

### **Represas**

- Concreto
- Enrocamiento o de tierra

### **Túneles**

- Aluvión
- Roca
- Corte y cobertura

**Tanques de almacenamiento**

- Subterráneos
  - a. Líquido
  - b. Sólido
- Superficiales
  - a. Líquido
  - b. Sólido
- Elevados
  - a. Líquido
  - b. Sólido

**Vías y Pavimentos**

- Ferrocarriles
- Carreteras
- Pistas

**Chimeneas (de orden industrial)**

- Mampostería
- Concreto
- Acero

**Grúas****Fajas de transporte****Torres**

- Líneas de transmisión eléctrica
  - a. Convencionales (menos de 30 m.)
  - b. Mayores (más de 30 m.)
- Comunicaciones
- Observación
- Marítimas

**Otras estructuras**

- Canales
- Retención de tierra
- Obras portuarias

**Equipo**

- Residencial
- Oficina (muebles, computadoras, etc.)
- Eléctrico
- Mecánico
- Laboratorios
- Trenes, camiones, aviones y otros vehículos.

## Capítulo 2

### Sistemas de Información Geográfica (SIG)

#### 2.1 Definición de un SIG

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un paquete informático diseñado para permitir la captura, manejo, modificación, manipulación, análisis, síntesis y despliegue de datos referidos en forma geográfica. Los objetos y características del mundo real son representados como elementos cartográficos con atributos asociados a ellos. El SIG combina las ventajas de los sistemas automatizados de cartografía, sistemas de manejo de bases de datos y sistemas de análisis y simulación.

#### 2.2 Ejemplos de aplicaciones de SIG

- La tecnología SIG es empleada en varios campos con el fin de resolver de manera eficaz, problemas que involucran información distribuida espacialmente
- Algunos ejemplos incluyen:
  - Uso de la tierra
  - Valoraciones impositivas
  - Manejo de instalaciones
  - Estimación de amenazas naturales
  - Manejo de recursos naturales
  - Estimación de impacto ambiental
  - Simulación de flujo de acuíferos
  - Almacenaje y manipulación de información geotécnica de perforaciones
  - Minería
  - Despacho de vehículos de emergencia
  - Ruteo de flujo de tránsito
  - Estudios de población
  - Investigación demográfica y de mercadeo

### 2.3 Paquetes SIG disponibles en el mercado

Actualmente existen alrededor de 100 productos relacionados con los SIG. Estos varían en capacidad, complejidad, habilidad para interactuar con otros paquetes informáticos, precio y requisitos de plataforma computacional y sistema operativo.

Para la realización de este proyecto se utilizó el paquete SIG denominado como ARC/INFO PC Versión 3.5. Algunas de las características de los paquetes disponibles son:

#### MapInfo

- Programa de mapeo a base de rastreo y hecho para funcionar bajo el ambiente Windows.
- Cuenta con un sistema completo para la visualización de los datos y con herramientas para el análisis geográfico y permite la elaboración sencilla de mapas sofisticados.
- El lenguaje de programación incluido, MapBasic, puede ser empleado para crear aplicaciones MapInfo o bien para integrar MapInfo con otras aplicaciones como por ejemplo, sistemas de manejo de bases de datos y hojas electrónicas.
- El paquete incluye varios tipos de mapas y datos junto con los programas.

#### ARC/INFO

- Desarrollado por Environmental Systems Research Institute (ESRI) en California, U.S.A.
- Reconocido como el estándar mundial para SIG, con más de 30 000 usuarios en unas 7 mil entidades en el mundo.
- Usado para automatizar, manipular, analizar y desplegar datos geográficos mediante cientos de herramientas sofisticadas diseñadas para el cartografiado automático, conversión de datos, manejo de bases de datos, concatenación de mapas y análisis espacial, despliegue e indagación interactivos, edición gráfica y geocodificación de direcciones.
- Puede operar tanto con modelos de datos de rastreo como de vectores e incluye una interface de manejo de base de datos relacional que permite la integración con sistemas comerciales de manejo de bases de datos.
- La versión 3.5 para PC Windows solo puede manejar datos en forma vectorial, la versión para plataforma Windows NT si permite ambos tipos de datos.
- El fabricante también ofrece otros productos relacionados con el SIG, tales como el ArcView, un sistema para computador PC que permite almacenar, indagar, analizar y desplegar información en el ambiente Windows .

## 2.4 Atributos y componentes de un SIG

- Los atributos y componentes de un SIG pueden dividirse en las siguientes categorías (según Arbeit, 1990):
  - Captura de datos
  - Análisis
  - Manipulación
  - Indagación
  - Despliegue/Reporte

### 2.4.1 Captura de datos

- Se refiere a la entrada de datos a un SIG.
- Objetos del mundo real con ubicaciones geográficas deben ser convertidos en elementos cartográficos dentro del SIG.
- Usualmente la parte más cara y que más tiempo consume dentro de un proyecto de SIG.
- Dependiendo de la capacidad del paquete SIG, los datos pueden ser introducidos al SIG mediante lectores ópticos, digitalizadores, archivos ASCII, o por conversión de datos.

#### Lectura óptica

- Usado para datos en forma de mapas publicados
- La calidad de la lectura depende de la resolución del lector óptico y la calidad de la publicación original
- El mapa debe ser geo-referenciado (el SIG debe saber donde se ubica el mapa con respecto al mundo real en términos de coordenadas tales como longitud y latitud)
- Se deben agregar atributos a cada elemento cartográfico

#### Digitalización

- Utilizado también para datos en forma de mapas publicados
- Usualmente más preciso (requiere de menos correcciones) que la lectura óptica, pero consume más tiempo
- Mapa debe ser geo-referenciado en el SIG y se deben agregar atributos a cada elemento digitalizado

#### Archivos ASCII

- El proceso (y el formato de los datos de entrada) cambia dependiendo del SIG utilizado
- Usualmente cada elemento cartográfico es referido en el archivo de texto mediante un número de identificación y la ubicación de coordenadas (e.g., latitud y longitud)

- Es necesario utilizar varias coordenadas para definir elementos línea así como los bordes de elementos área.
- El método más rápido y fácil si los elementos a cartografiar ya han sido ubicados (i.e., asignación de coordenadas de algún tipo) y han sido leídos en formato digital tal como en una base de datos o una hoja electrónica.

#### Conversión de datos

- Archivos de datos y mapas pueden ser convertidos de otro paquete SIG o programas similares (e.g., sistemas CAD o programas de procesamiento de imágenes de satélite) o de un archivo digital de formato estándar (e.g, los archivos en formato DLG producidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) al SIG seleccionado.
- La capacidad depende de los programas involucrados en la conversión.
- Algunas conversiones pueden ser hechas automáticamente dando como resultado mapas libres de errores, otros requieren de varios comandos y pueden perder información en el proceso de conversión.
- La capacidad de un SIG para leer datos provenientes de otro paquete se vuelve importante conforme aumenta la disponibilidad de datos digitales en diferentes formatos.

#### **2.4.2 Análisis**

- Los tipos de análisis que pueden llevarse a cabo con un SIG varían entre los diferentes paquetes disponibles.
- Los siguientes procedimientos de análisis son típicos de un SIG (y ayudan a definir al paquete como un verdadero SIG y no simplemente un programa de cartografiado automático).

#### Superposición e intersección de mapas

-Las superposiciones de diferentes mapas permiten el análisis de las relaciones espaciales entre los diferentes tipos de datos.

-Intersección para la creación de un nuevo mapa a partir de dos o más mapas.

-Existen varios tipos de procedimientos de intersección, pero en el sentido más general, el nuevo mapa contendrá todos los elementos de cada uno de los mapas a partir de los cuales fue creado.

#### Análisis de atributos

- Los atributos asociados a elementos cartográficos pueden ser analizados con funciones tales como expresiones lógicas o matemáticas

- Nuevos atributos son usualmente creados como funciones de atributos existentes, especialmente para un nuevo mapa creado a partir de una intersección de mapas.

### Mediciones

- Ejemplos de mediciones de datos cartografiados incluyen longitud, area, ángulo, pendiente, o distancia entre dos ubicaciones.
- Las mediciones son usualmente dadas en unidades de coordenadas del mapa, de esta forma, mapas referenciados mediante latitud y longitud deben ser proyectados a la superficie de la Tierra para la medición en unidades normales (e.g., metros o pies).

### Análisis de redes

- Usado para resolver problemas que tratan con la conectividad de elementos cartográficos, tales como distribución de tránsito o flujo en tuberías.
- Los esquemas de almacenamiento de datos en la mayoría de los SIG son diseñados para facilitar los análisis de red o de conectividad.

### Análisis de cercanía

- Las relaciones espaciales entre datos cartográficos son analizadas con procedimientos de cercanía o proximidad.
- Se pueden tomar decisiones con base en la cercanía (o lejanía) que un item dado tenga con respecto a otros ítems, especialmente en un mapa nuevo creado a partir de una intersección de mapas.

### Interpolación

- Se refiere a la aproximación de información no disponible para una cierta ubicación con base en información disponible en las localidades circunvecinas.
- Existen esquemas de interpolación de varios tipos en un SIG tales como generar contornos o usar promedios de distribuciones espaciales.

### 2.4.3 Manipulación

- Los tipos de manipulación de datos que pueden llevarse a cabo con un SIG varían entre los diferentes paquetes disponibles
- Los siguientes procedimientos de manipulación de datos son típicos de un SIG y ayudan a definir el paquete como un verdadero SIG y no simplemente un programa de cartografiado automático:

#### Fusión de mapas

- Se refiere a la unión de dos mapas, usualmente de regiones diferentes pero adyacentes, para formar un mapa combinado que cubre ambas regiones.
- Los elementos cartográficos y los atributos asociados a ellos generalmente requieren ser del mismo tipo y tener las mismas definiciones para que la fusión sea exitosa.

#### Proyección

- Usado para representar la superficie curva de la Tierra en una superficie bidimensional (i.e., la pantalla de la computadora o los mapas impresos).
- Usado para convertir mapas referenciados mediante latitud y longitud a coordenadas que puedan ser medidas en pies o metros.
- Hay varios esquemas de proyección que usan formas geométricas diferentes para representar la superficie de la Tierra como una superficie plana; la mayoría de los paquetes SIG respaldan varios de los tipos más comunes.
- Un cuadro o ventana de recorte es definido usualmente de acuerdo a las coordenadas de sus vértices y las porciones del mapa matriz ubicadas dentro de la ventana son copiadas al nuevo mapa.

#### Actualización

- Los elementos cartográficos y los atributos asociados a ellos deben ser mantenidos al día con respecto a su ubicación y a sus datos descriptivos.
- Procedimientos de actualización de los mapas y sus atributos varían entre los diferentes paquetes SIG, pero la mayoría permiten la actualización de elementos y registros individuales así como también procesamiento en grupo.

### Generalización

- Usado para eliminar elementos cartográficos que podrían ser innecesarios o que podrían estar añadiendo confusión o error a un mapa.
- Usualmente usado para suavizar líneas dentadas mediante la eliminación de vértices intermedios.

### Agregación

- Usado para combinar datos de varias maneras dependiendo de la capacidad del paquete SIG utilizado.
- Varios elementos cartográficos con sus atributos asociados pueden ser combinados y representados como un solo elemento con nuevos atributos que representen el tipo de combinación utilizado (e.g., suma, producto, promedio, maximización).

#### **2.4.4 Indagación**

- Una pregunta que es usada para facilitar el acceso a, y el análisis de, un conjunto de atributos.
- Usada para identificar un conjunto específico de elementos cartográficos sobre los cuales se puede hacer un análisis o una manipulación.
- Los lenguajes de indagación varían entre los diferentes paquetes SIG y de acuerdo con los tipos de modelos de datos que se involucren, pero en la mayoría de los casos se usa el SQL, *Standard Query Language*, o bien, algún derivado de éste.
- Por ejemplo, un comando SQL con la siguiente sintáxis:  

```
SELECT id FROM edificios WHERE pérdida>10000
```

dará como resultado los números de identificación de todos los edificios en el archivo de datos denominado "edificios" que tengan pérdidas mayores a 10 000.
- Algunos paquetes SIG pueden interactuar con programas comerciales de manejo de bases de datos y requieren de comandos específicos del programa para realizar operaciones de indagación.

- Las indagaciones con SIG son usualmente de los siguientes dos tipos:

#### Indagación Espacial

- Usado para preguntas relativas a la ubicación de los elementos cartográficos, así como también entre los elementos mismos.
- Un ejemplo es la selección de todos los edificios que estén ubicados a menos de 5 Km de distancia de una falla activa.

#### Indagación de Atributos

- Usado para indagaciones relativas a los atributos asociados con los elementos cartográficos.
- El ejemplo del comando SQL presentado anteriormente es una indagación de atributo; otro ejemplo es la selección de todos los edificios construidos con mampostería no reforzada.

### **2.4.5 Despliegue y reporte**

- Uno de los aspectos más importantes de un SIG es su habilidad para desplegar y reportar información tal como datos almacenados, superposición de mapas y análisis de resultados.
- Usado para facilitar la transferencia de información de los analistas a los ejecutores de una manera clara y eficaz.
- La mayoría de los paquetes SIG pueden desplegar y reportar información en los siguientes formatos:

#### Tablas

- Usado para reportar atributos, tanto de todos los registros como de aquellos resultantes de una indagación.
- Los atributos a incluir y el formato de la lista son usualmente establecidos por el usuario.
- Puede ser mostrado en el monitor de la computadora o impreso en papel.

### Despliegue de mapas

- Permite la comunicación rápida y clara de la información cartografiada (e.g., datos de entrada y resultados).
- Varios mapas pueden ser superpuestos en el monitor para mostrar las relaciones espaciales entre los datos o los resultados.
- La adición de anotaciones, leyendas y otros ítemes ayudan a aclarar la información del mapa.
- Los mapas pueden ser mostrados en pantalla de computador o impresos en papel.

### Despliegue en Terminales

- Tablas y mapas son usualmente desplegados en terminales de computador.
- Un monitor de alta resolución y pantalla grande mejora la calidad del despliegue.

### Archivos de datos

- Tablas generadas por reportes de datos y resultados son desplegados en terminales, impresos en papel o guardados en archivos de datos de salida.
- Dependiendo de la capacidad del paquete SIG, los archivos de datos de salida pueden ser escritos en varios formatos, tales como formato de hojas electrónicas, archivos de texto ASCII, formatos de bases de datos y otros relacionados con paquetes SIG.

## **2.5 Características de los datos de un SIG**

- Los datos asociados con un SIG pueden ser divididos en los siguientes dos tipos:

### **Datos Espaciales (Gráficos)**

- Representación digital (con elementos cartográficos) de objetos del mundo real.

La representación de los datos espaciales dentro del SIG es hecha con el modelo de rastreo o con el modelo vectorial (adaptado de Frost & Chameau, 1993) o una variación de alguno de estos dos modelos.

### Modelo de Rastreo

- El área de interés es dividida en celdas y el valor correspondiente a cada celda indica el tipo de objeto o característica de la localidad.
- Si el área es dividida en celdas de 5m por 5m, entonces la ubicación del objeto puede ser determinada únicamente con precisión de 5m de las direcciones principales.

- Usualmente las celdas no corresponden a la característica que éstas representan en el mundo real (e.g., se requiere de un grupo de celdas para representar un elemento tal como un lago).
- Ventajas del modelo de rastreo incluyen:
  - Operaciones sencillas de estructura de datos y superposición de mapas son implementadas eficazmente.
  - Alta variabilidad espacial es representada eficazmente con el formato de rastreo.
  - Formato de rastreo es requisito típico para el trabajo con imágenes digitales.
- Desventajas del modelo de rastreo incluyen:
  - Menos compacto, usualmente requiere de compresión de datos.
  - Relaciones topológicas son más difíciles de representar.
  - Bordes de los mapas tienden a tener apariencia dentada o escalonada.

### Modelo vectorial

- Objetos o características del mundo real son representados como puntos, líneas o polígonos que definen sus bordes.
- Ventajas del modelo vectorial incluyen:
  - Estructura de datos mas compacta.
  - Codificación eficiente de la topología e implementación más eficaz de las operaciones que requieren información topológica, tal como análisis de redes.
  - Resultado gráfico se compara bien con los mapas dibujados a mano.
- Desventajas del modelo vectorial incluyen:
  - Operaciones complejas de estructuras de datos y de superposición de mapas son más difíciles de llevar a cabo.
  - Representación de variabilidad espacial alta es ineficiente.
  - El trabajo con imágenes digitales no es hecho en forma efectiva.

### **Datos Tabulares (No Gráficos)**

- Atributos están asociados con datos espaciales.
- Son almacenados en formato alfanumérico y son representaciones de las características, cualidades y relaciones entre elementos cartográficos y localidades geográficas.
- Pueden ser almacenados en la base de datos interna del paquete SIG, aún cuando estas bases son usualmente limitadas en cuanto a su capacidad para almacenar grandes cantidades de datos y en cuanto a su capacidad funcional.
- Algunos paquetes SIG tienen la capacidad de enlazar datos espaciales y tabulares con tablas de atributos en un sistema de manejo de bases de datos externo y de alto nivel mediante el uso de una interface.

La figura 1.1 muestra un ejemplo de enlaces de datos (espacial, tabular, sistema de manejo de base de datos externo) dentro del SIG.

## 2.6 Estructura de base de datos

- Un sistema de manejo de bases de datos es un paquete que provee un medio sistemático para almacenar, actualizar y recuperar información almacenada como datos, usualmente en forma de registros en un archivo.
- El manejo de bases de datos de datos espaciales y tabulares constituyen una parte integral de un SIG.
- La mayoría de los paquetes SIG tienen incorporado un sistema de manejo de bases de datos que varía en cuanto a capacidad y tipo de lenguaje interno de comandos utilizado.
- Algunos paquetes SIG tienen la capacidad de interactuar con sistemas de manejo de bases de datos externos, lo cual es usualmente necesario cuando los requisitos de capacidad del manejador superan al sistema incluido en el SIG.
- Los tres tipos mas comunes de estructuras de base de datos se muestran en la figura 1.2 e incluyen lo siguiente (adaptado de Frost & Chameau, 1993):

### Estructura Jerárquica

- La información se dispone en forma de conjuntos y subconjuntos, estructurada en formato de árbol o de ramificación.
- El acceso a una pieza específica de información debe hacerse a través de un camino único, usualmente una búsqueda de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba.
- Para obtener información se usa generalmente un lenguaje de indagación por procedimiento, en el cual se adjuntan enlaces adicionales a los registros de datos mientras se construyen las bases de datos que luego son usados como una guía durante las búsquedas.

### Estructura de Red

- Los registros son agrupados en jerarquías de dos niveles denominados conjuntos, sin embargo, una porción de los datos puede pertenecer a más de un conjunto
- Información de un mismo conjunto es almacenada muy cerca y puede ser obtenida al mismo tiempo
- También usa un lenguaje de indagación por procedimiento para obtener información.

**Estructura Relacional**

- La base de datos consiste en archivos con datos dispuestos en arreglos bidimensionales, usualmente como tablas con registros.
- Permite recombinar los datos individuales para formar relaciones diferentes resultando en mayor flexibilidad en el uso de la información.
- Usa un lenguaje de indagación, no por procedimiento (usualmente SQL), sino más bien independiente de la estructura de base de datos permitiendo un medio mas flexible para la obtención de la información.
- Es la estructura primaria usada en la mayoría de paquetes SIG, pero algunos paquetes tienen la capacidad de interactuar con sistemas de manejo de bases de datos externos que usan estructuras de datos jerárquicos o de red.

## Capítulo 3

### Esquema de Análisis de Amenaza Sísmica

#### 3.1 Método general

- **Objetivo:** Estimar el movimiento del suelo, la licuefacción, el desplazamiento diferencial, los deslizamientos, inundaciones y fuego debidos a la ocurrencia de un terremoto.
- **Propósito:**
  - Planeamiento y uso de la tierra.
  - Diseño de estructuras sismo-resistentes.
  - Estimación de daño regional.
  - Estimación de pérdidas regionales.
  - Preparativos y respuesta de emergencia.
  - Criterios y normas de reforzamiento de edificaciones.
  - Análisis de riesgo de seguros.
  - Manejo de portafolios financieros.

#### 3.2 Tipos de análisis

- **Determinístico (ADAS)**
  - Escenario de eventos en fallas conocidas.
  - Atenuación determinística del movimiento del suelo.
- **Probabilístico (APAS)**
  - Provee la probabilidad de excedencia de diferentes niveles de movimiento del suelo.
  - Considera todas las fuentes sísmicas en una región.
  - Integra la contribución de todas las fuentes sísmicas.
  - Pondera los diferentes eventos con su respectiva probabilidad de ocurrencia.
  - Incluye la incertidumbre de cada parámetro.

#### 3.3 Modelaje de sismicidad y fallas

- **Tipos de fallas y su representación geométrica**
  - Corrimiento lateral. Segmentos lineales digitalizados a lo largo de trazas conocidas.
  - Normal o inversa. Planos buzantes.

- Fallas ciegas. Planos buzantes sub-superficiales.
- Zonas de subducción. Uno o más planos buzantes.
- Sismicidad de fondo en un área determinada. Fuentes de área someras con sismicidad uniforme.

- **Parámetros característicos de la falla**

- Dimensiones y geometría de la falla.
- Tasa de Sismicidad, dada por:

$$\log N(m) = a + bm$$

donde

$m$  = magnitud del evento

$N(m)$  = número de eventos con  $M > m$

- Tasa de deformación.
- Magnitudes mínimas (con base en región geográfica y posible aplicación).
- Magnitud máxima (histórica, tectónica y heurística).
- Segmentación de la falla.
- Relación longitud de ruptura de falla vrs. magnitud esperada, dada por:

$$\log L = c + d \log m$$

donde

$L$  = longitud de ruptura (o área de ruptura)

$m$  = magnitud del evento

(podría variar dependiendo del tipo de falla; estimación de la longitud de ruptura: superficial, promedio, máxima, etc. Ver Coppersmith & Wells, 1994)

- **Estimación de parámetros y datos necesarios**

- Frecuencia sísmica —histórica e instrumental
  - Magnitud — $M_S$ ,  $M_W$ ,  $M_L$ ,  $m_B$ .
  - Intensidad — MMI.
  - Ubicación (latitud y longitud).
  - Hora, día y año de ocurrencia.
  - Profundidad focal.
- Tasa de deformación —geológica; geodésica; tectónica.
- Mapas —traza de fallas; elevación.
- Trincheras (para determinar ángulos de buzamiento, ubicación de fallas ciegas, etc.).

### 3.4 Modelaje de la frecuencia sísmica

- **Eventos Poissonianos**
  - Usa el modelo estocástico de Poisson (Cornell, 1968; Der Kiureghian & Ang, 1977).
  - Los eventos son independientes en el tiempo.
  - Los eventos están distribuidos uniformemente en el espacio.
  - Válido para eventos de pequeños a moderados.
  - Incumple con los mecanismos básicos de generación de terremotos de fuertes a grandes.
  - Sencillo y por lo tanto de uso difundido.
- **Eventos característicos** - terremotos repetidos sobre el mismo segmento de falla (Youngs & Coppersmith, 1985).
- **Eventos dependientes del tiempo** - (e.g., Kiremidjian & Anagnos, 1984)
  - Basado en la teoría del rebote elástico.
  - Fecha y/o tamaño del siguiente evento depende en la fecha y/o tamaño del evento anterior.
  - Usado para terremotos de fuertes a grandes.
  - Presenta dificultades para la definición de parámetros.
  - Tipos de modelos dependientes del tiempo:
    - modelos estocásticos.
    - modelos Markov para predicción de tiempo.
    - modelos Markov para predicción de deformación.

### 3.5 Modelaje del movimiento del suelo

Dos enfoques en general:

- **Simulación del movimiento del suelo**
  - Funciones empíricas de Green
  - Métodos de modo normal
  - Métodos de trazado de rayos

(Requiere de muchos parámetros; e.g., área de ruptura, caída de esfuerzos, velocidad de ruptura, tiempo de ascenso, momento sísmico, etc.)

- **Relación empírica de atenuación del movimiento del suelo**

$$\ln Y = C_1 + C_2M + C_3M^{C_4} + C_5 + \ln(R + C_6e^{C_7M}) + C_8R + f(\text{fuente}) + f(\text{sitio})$$

donde

$Y$  = parámetro del movimiento del suelo (PGA,  $S_a$ ,  $S_v$ , etc.).

$M$  = magnitud.

$R$  = distancia de la fuente al sitio.

$f(\text{fuente})$  = efecto del tipo de fuente, tales como corrimiento lateral, normal, inversa o subducción.

$f(\text{sitio})$  = efecto de la condiciones del sitio.

$C_1$  a  $C_8$  = coeficientes de mejor ajuste.

Se han desarrollado muchas relaciones de atenuación.

- **Tópicos relacionados con el movimiento del suelo**

- Selección del parámetro de movimiento sísmico.

- $PHA$  = aceleración pico horizontal

- $S_a(\omega, \xi)$  = aceleración espectral para frecuencia y amortiguamiento dados

- $S_v(\omega, \xi)$  = velocidad espectral para frecuencia y amortiguamiento dados

- distancia de la fuente al sitio.

- variabilidad en los datos.

- volumen de datos para diferentes valores  $M$  y  $R$ .

- calidad de los datos.

- dependencias regionales y transferabilidad.

- clasificación de suelos.

- incertidumbres.

### 3.6 Estimación de la Amenaza en Sitio

- **Evento escenario** (*Este es el tipo de estimación usado en el presente estudio*):

- Método: Especificar la magnitud y ubicación del terremoto y usar una relación empírica de atenuación para estimar el movimiento del suelo en sitio; se puede requerir de varios escenarios;

- Resultado: Valor único del movimiento del suelo.

- Ventajas: Valor único; de fácil manejo.

- Desventajas: Puede ser muy conservador en relación con el potencial de ocurrencia del evento; puede subestimar el potencial de ocurrencia de sismos de tamaño moderado, pero mas frecuentes; puede resultar en diferentes niveles de riesgo para el diseño en diferentes localidades.

- **Estimación probabilística**

- Método: Integrar sobre todas las fallas, todas las magnitudes y todas las distancias.

- Resultado:

(a) Probabilidad de excedencia de los parámetros del movimiento sísmico para una ventana de tiempo específica y dada por

$$P[Y > y^*, (0, t)] = \int \int P[Y > y^* / m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr$$

donde

$Y$  = parámetro del movimiento del suelo

$m$  = magnitud del terremoto

$r$  = distancia de la fuente al sitio

$f_X(x)$  = función de densidad de probabilidades de la variable  $X$

$P[\cdot]$  = probabilidad de que suceda el evento ·

(b) Movimiento del suelo como función del período de retorno,  $RP$ , del evento,

$$RP = \frac{1}{\text{probabilidad.anual.de.excedencia.del.movimiento.sísmico}}$$

- Ventajas: Integra la contribución de todas las fallas y fuentes sísmicas; pondera la probabilidad de ocurrencia de los diferentes eventos de manera que el movimiento sísmico para diseño es consistente con el riesgo de exposición; incorpora las incertidumbres en los parámetros y la naturaleza aleatoria del fenómeno sísmico; permite al usuario hacer una selección a partir de varias opciones.

- Desventajas: Dificultad de entendimiento para los no expertos; demasiadas alternativas de movimiento sísmico; movimiento sísmico para un nivel de riesgo específico puede ser menor que el resultante de un terremoto atípico.

### 3.7 Análisis de incertidumbre

- **Tipos:**

- De modelaje
  - modelos geométricos de fuente sísmica
  - modelos de recurrencia
  - modelos de atenuación
- Paramétrica
  - asignación paramétrica de la geometría de la falla
  - fórmulas de recurrencia (log-lineal, evento característico, deformación, etc.)
  - parámetros de atenuación
  - parámetros de longitud o área de ruptura
  - asignación de magnitud máxima

- **Simulación de Monte Carlo**

- Simula muchos valores para cada modelo y cada parámetro.
- Consume mucho tiempo.

- **Enfoque de árbol lógico**

Se consideran diferentes parámetros y modelos con las correspondientes probabilidades. La amenaza en el sitio será el promedio ponderado de todos los modelos y parámetros, donde la ponderación se hace con respecto a las probabilidades para cada modelo y parámetro.

### 3.8 Efectos locales del sitio

Requiere del conocimiento de las condiciones locales del suelo; (e.g., profundidad del basamento de roca, espesor de las capas de suelo, densidad, velocidad de onda cortante, SPT, CPT, nivel freático)

- **Amplificación del movimiento sísmico**

- relaciones empíricas de atenuación (tipos de suelo A, B,C);
- modelo unidimensional de propagación de onda cortante (e.g., SHAKE, DESRA 2D);
- modelos bidimensionales y tridimensionales (efecto de cuenca, efecto de cumbre).

Un ejemplo de un factor sencillo de amplificación del movimiento que puede ser aplicado al correspondiente parámetro de movimiento sísmico es el propuesto por Borchardt:

$$F = \left( \frac{v}{v_o} \right)^{m_{TI}}$$

donde

$v$  = velocidad de onda cortante en los 30 metros superiores del suelo del sitio

$v_o$  = velocidad de onda cortante promedio para el tipo de sitio escogido como codición del suelo de referencia

$m_{TI}$  = exponente basado en el período y la intensidad del movimiento

- **Licuefacción** - se presenta en suelos granulares saturados; depende de la severidad y duración del movimiento sísmico; se manifiesta como corrimiento lateral y erupciones de arena.

- mapas de potencial de licuefacción;

- cartografiado de la severidad de licuefacción (LSI-índice de severidad de licuefacción, Youd & Perkins, 1987);

$$\log(LSI) = -3.49 - 1.85 \log R + 0.98 M_w \leq 100$$

donde

$LSI$  = índice de severidad de licuefacción

$R$  = distancia superficial del sitio a la zona de liberación de energía (km)

$M_w$  = magnitud de momento

- investigación de sitio - requiere parámetros del suelo y acelerograma

- predicción del corrimiento lateral inducido por licuefacción, Hamada et al., (1986):

$$\delta = 0.75 \sqrt{h}^3 \sqrt{\theta_g}$$

donde

$\delta$  = desplazamiento horizontal del suelo, en metros

$h$  = espesor de la capa licuefable, en metros

$\theta_g$  = pendiente

Baziar (1991) propuso las siguientes relaciones basadas en el modelo del bloque deslizando de Newton

$$\delta = 2 \frac{V_{\max}^2}{A_{\max}} F$$

donde

$\delta$  = desplazamiento horizontal del suelo

$V_{\max}$  = velocidad pico horizontal

$A_{\max}$  = aceleración pico horizontal

$F$  = factor de forma

- **Deslizamientos** - falla de las pendientes tanto naturales como artificiales debido a inestabilidad del suelo;
  - desprendimientos, deslizamientos, avalanchas de roca;
  - desprendimientos, deslizamientos, avalanchas de suelo;
  - modelaje de susceptibilidad a deslizamientos (función de la magnitud del sismo y de la distancia a la fuente);
  - modelaje del área afectada (función de la magnitud del sismo y de la distancia a la fuente).
- **Ruptura superficial del suelo**
  - modelaje de la longitud de ruptura;
  - modelaje del desplazamiento promedio y máximo de la falla;
  - estimación de la zona de distorsión debida al desplazamiento de la falla.

### 3.9 Amenazas colaterales

Amenazas que pueden ocurrir como resultado de efectos indirectos del evento sísmico.

- **Inundación:** - inducida por falla de represas y reservorios; requiere de información topográfica, nivel de almacenamiento, volumen de agua, etc.
  - cartografiado del área de inundación;
  - cartografiado de la profundidad de inundación;
  - modelaje del flujo de escombros - volumen y velocidad.
- **Incendios**
  - modelaje de fuentes de ignición (e.g., a partir de estadísticas de ignición, identificación de instalaciones con alto riesgo de fuego);
  - modelaje de la disponibilidad de agua (requiere de un análisis de líneas vitales);
  - modelaje de la densidad y distribución de edificios;

- modelaje de la velocidad y dirección de los vientos (variaciones estacionales);
- modelaje del contenido de humedad ambiente.

## Capítulo 4

### Determinación de la Amenaza Sísmica mediante SIG

#### 4.1 Datos digitales requeridos

- Información compilada sobre la frecuencia sísmica que pueda ser cartografiada como puntos en un SIG incluyen la siguiente información para cada evento:
  - Ubicación
  - Magnitud
  - Fecha de ocurrencia
  - Profundidad
- Información de la falla incluyendo los siguientes parámetros:
  - Ubicación
  - Longitud
  - Tasa de deformación
  - Angulo de buzamiento
- Mapas de ubicación de fallas están usualmente disponibles y podrían necesitar ser digitalizados o leídos con lector de barrida si no se encuentran en formato SIG.
- Usualmente es necesario añadir a mano los atributos parametrales de la falla a los elementos de línea correspondientes dentro del SIG.
- Información de suelos tal como la siguiente:
  - Mapa de geología superficial
  - Mapa de profundidad de roca basal
  - Perforaciones de suelo describiendo los perfiles de velocidad de onda cortante, densidad, y ubicación del nivel freático

#### 4.2 Modelaje del movimiento del suelo

##### 4.2.1 Análisis probabilístico

- El método más sencillo es hacer un enlace a un programa de análisis de amenaza sísmica que haya sido desarrollado para la región y que contemple los siguientes pasos:
  - Dividir la región en una malla de puntos equidistantes.

- Llamar al programa externo en cada punto de la malla usando los parámetros de entrada utilizados por el programa tales como latitud y longitud, probabilidad de excedencia, ventana de tiempo, condiciones del suelo en el sitio y parámetro de movimiento del suelo a determinar.
  - Usar un programa de determinación de contornos para presentar los resultados en los puntos de la malla.
  - Para análisis de amenaza en un sitio, llamar al programa para la ubicación deseada con los parámetros de entrada requeridos.
- Un método más complejo (pero probablemente mas ampliamente aplicable y capaz de ser mejorado) es usar el lenguaje de programación macro del SIG para realizar el análisis dentro del mismo SIG considerando los siguientes pasos:
    - Modelo de frecuencia de eventos en cada fuente sísmica en la región (modelo de Poisson, modelo de eventos característicos, modelo para eventos dependientes en el tiempo, etc.).
    - Para cada fuente, estimar el movimiento sísmico en el sitio (incluyendo las condiciones de sitio) usando simulación del movimiento o funciones de atenuación.
    - En cada sitio, integrar la contribución del movimiento sísmico de cada fuente, incluyendo la ponderación de la probabilidad de ocurrencia de los diferentes eventos.
    - El resultado es la probabilidad de excedencia de los parámetros escogidos de movimiento sísmico para una ventana de tiempo específica, o movimiento del suelo como función del período de retorno.
    - Dividir la región en una malla de puntos equidistantes y repetir el análisis en cada punto de la malla.
    - Usar un programa de determinación de contornos para presentar los resultados en los puntos de la malla.
    - Para análisis de amenaza en un sitio, realizar análisis en la ubicación deseada con los parámetros de entrada requeridos.

#### 4.2.2 Análisis determinístico

- Para paquetes de SIG capaces de realizar análisis por rastreo, los siguientes pasos son comúnmente usados:
  - Dividir la región en una malla de puntos equidistantes.
  - Especificar la ubicación y magnitud del terremoto (terremoto máximo creíble, repetición de un terremoto anterior, terremoto para política de planificación, etc.).
  - Selección de la relación de atenuación aplicable para la región.
  - Para cada punto de la malla, calcular el movimiento del suelo en el sitio a partir de magnitud, distancia epicentral y condiciones locales del suelo.
  - Usar un programa de determinación de contornos para presentar los resultados en los puntos de la malla.
  - Para análisis de amenaza en un sitio, realizar análisis en la ubicación deseada con los parámetros de entrada requeridos.

- Para paquetes de SIG capaces de realizar análisis basado en vectores, los siguientes pasos son comúnmente usados:
  - Especificar magnitud y ubicación del evento sísmico.
  - Asignar el evento a una falla cartografiada y/o determinar la ubicación y longitud de la ruptura de la misma.
  - Generar polígonos equidistantes (usualmente espaciamientos de 1 Km) de amortiguamiento alrededor de la línea de ruptura de la falla.
  - Asignar a cada polígono de amortiguamiento el nivel de movimiento del suelo basado en la distancia del polígono a la zona de ruptura de la falla y la magnitud del evento.
  - Superponer el mapa de geología superficial u otra información parametral del suelo y modificar el movimiento del suelo para las condiciones locales de sitio.
  - El resultado final es un mapa del movimiento sísmico superficial a base de polígonos.
  - Para un análisis de amenaza en un sitio, simplemente localizar el sitio en el mapa.
  - La figura 3.1 ilustra el modelo de movimiento sísmico en un SIG con modelo vectorial

### 4.3 Efectos locales del sitio

#### 4.3.1 Modificación del movimiento del suelo

- Modelos empíricos:
  - Factores de amplificación o desamplificación se encuentran usualmente intrínsecos en las relaciones de atenuación.
  - Requiere de la descripción de las condiciones de suelo en términos de la clasificación utilizada en las relaciones de atenuación (e.g., A, B, C, D, etc.).
  - En análisis basados en SIG con utilización de malla de puntos, usualmente se le asigna un tipo de suelo predominante a cada punto de la malla a ser usado en el modelo de atenuación.
  - En análisis basados en SIG con superposición de mapas de polígonos, se superpone un mapa de tipos de suelo en el mapa de movimiento sísmico en roca para así amplificar o desamplificar el movimiento y producir un mapa final de movimiento sísmico superficial.
- Modelos unidimensionales de ondas cortantes:
  - Los modelos requieren acelerogramas en la roca basal e información sobre las capas de suelo suprayacentes (e.g., velocidad de onda cortante, densidad y espesor de la capa).
  - Los modelos son usualmente considerados mediante programas externos al SIG en cada sitio de perforación y con acelerogramas en roca dados.

- El lenguaje de programación macro del SIG usualmente no es lo suficientemente sofisticado como para realizar programas de modificación del movimiento sísmico.
  - Se pueden desarrollar mapas de contornos de niveles de movimiento o bien, factores promedio de modificación pueden ser desarrollados para ser aplicados a toda una región.
  - El método sirve tanto para análisis por malla de puntos como para análisis por superposición de polígonos.
  - También es posible primero desarrollar un mapa con las propiedades de suelo promedio basado en perforaciones y programas especiales de análisis estadístico espacial (o modelar regiones enteras como un perfil de dos capas, e.g. suelo aluvional sobre roca, basado en mapas de la geología superficial y profundidad a roca basal) y luego utilizar un programa externo de amplificación del movimiento del suelo.
- Modelos bidimensionales y tridimensionales:
    - Modelos muy complicados usualmente desarrollados para regiones con condiciones específicas tales como efectos de cuenca o de cumbre
    - Muchos modelos requieren de paquetes SIG y equipos computacionales de alto nivel para funcionar de manera eficaz

#### 4.3.2 Licuefacción

- Enfoque simplificado:
  - Requiere de mapas de potencial de licuefacción desarrollados previamente para una región, que describan el potencial como alto, moderado, bajo y muy bajo.
  - Si no está de antemano disponible en formato digital, es necesario introducirlo al SIG mediante digitación o con lector óptico de barrida.
- Modelos empíricos:
  - Modelo de tipo atenuación que da la severidad de la licuefacción como una función de la magnitud del sismo y la distancia epicentral.
  - Los modelos son llevados a cabo en el SIG de la misma manera en que fue descrito para los modelos de atenuación del movimiento sísmico.

- Modelos analíticos:
  - Envuelve el uso de modelos unidimensionales que consideran el incremento de la presión de poros.
  - Los modelos son llevados a cabo en el SIG de la misma manera en que fue descrito para los modelos de ondas de corte unidimensionales para la estimación de la amplificación del movimiento sísmico

#### 4.3.3 Deslizamientos

- Enfoque simplificado:
  - Requiere de mapas de potencial de deslizamiento desarrollados previamente para una región, que describan el potencial como alto, moderado, bajo y muy bajo.
  - Si no está de antemano disponible en formato digital, es necesario introducirlo al SIG mediante digitación o con lector óptico de barrida.
- Modelos empíricos:
  - Modelo de tipo atenuación que da la severidad del deslizamiento como una función de la magnitud del sismo y la distancia epicentral.
  - Los modelos son llevados a cabo en el SIG de la misma manera en que fue descrito para los modelos de atenuación del movimiento sísmico.
- Modelos analíticos:
  - Envuelve el uso de modelos que calculen la aceleración crítica requerida para movilizar una masa de suelo.
  - Los parámetros que deben ser usualmente cartografiados incluyen pendiente, contenido de agua, cobertura de suelo, densidad y la ubicación de deslizamientos previos.
  - Los modelos pueden consistir de funciones simples que pueden ser programadas usando el lenguaje macro del SIG o pueden ser más complicadas requiriendo llevarse a cabo como programas externos.

#### 4.3.4 Ruptura del suelo

- Enfoque más utilizado:

- Estimar la longitud de ruptura de la falla como una función de la magnitud del sismo (también requerido para llevar a cabo modelos de atenuación del movimiento sísmico en SIG basados en vectores).
- Estimar desplazamiento vertical y horizontal de la falla como una función de la longitud de ruptura.
- Suponer que regiones dentro de una distancia dada de la ruptura (usualmente de 100 a 200 metros) son la falla y la zona de arrastre respectivamente.
- Las regiones de falla y zona de arrastre son definidas en el SIG mediante la creación de polígonos de amortiguamiento alrededor de la línea de ruptura de la falla.

#### **4.4 Amenazas colaterales**

##### **4.4.1 Inundación**

- La información necesaria de mapas en el formato SIG incluyen lo siguiente:
  - Ubicación y atributos de todas las represas y reservorios que puedan afectar la región
  - Mapa topográfico
- Existen algunos modelos que tratan inundaciones inducidas por terremotos, pero los pasos generales a seguir en un análisis de inundación basado en un SIG incluyen lo siguiente:
  - Para cada represa y reservorio que pueda afectar la región, determinar el área de cobertura y la profundidad del agua que ocurriría si la represa fuera a fallar (haciendo uso del mapa topográfico).
  - Basado en la estimación del daño debido al sismo (descrito en la próxima sección), suponer que las represas con un nivel de daño dado fallarán e inundarán la región en un área y profundidad determinados en el paso anterior.
  - Hacer una agregación de todas las aguas de inundación (área de cobertura y profundidad) en la región para todas las represas y reservorios que fallen.
  - Falla de represas y reservorios puede ser tratado también de una manera probabilística.
  - El resultado es un mapa de potencial de inundación para un análisis de amenaza sísmica específica.
- Existen modelos mas detallados basados en análisis de inundaciones que incluyen simulación, velocidad del agua y flujo de escombros.

#### 4.4.2 Incendios debidos a sismo

- La información contenida en el inventario de instalaciones de la región es usualmente suficiente para los modelos de incendio debidos a sismo.
- La mayoría de los modelos para incendios post-terremoto incluyen los siguientes pasos básicos:
  - Modelaje de ignición (en términos de ignición por metro cuadrado en edificios) se basa usualmente en la magnitud del evento (modelos desarrollados con datos empíricos).
  - Modelaje de la propagación del fuego se base generalmente en parámetros tales como la velocidad del viento, dirección del viento, estación del año, densidad de edificios y cualidad combustionante de los edificios.
  - Modelaje de la capacidad extintora se basa generalmente en parámetros como el daño al sistema de conducción de agua, cantidad de equipo y personal para combatir incendios disponible en la región.
- Modelaje de incendios debidos a terremotos basados en sistemas SIG se encuentra en una fase inicial de desarrollo (similar al caso de modelos de inundación).
- Los modelos vigentes para fuego debido a sismos varían desde simples funciones multiplicativas que califican a cada uno de los parámetros descritos anteriormente para combustión, propagación y capacidad extintora hasta modelos de simulación con mucha demanda computacional.

## 5. Referencias

- Antenuicci, J.C., K. Brown, P.L. Croswell, M.J. Kevany, and H. Archer (1991). *Geographic Information Systems: A Guide to the Technology*, Van Nostrand Reinhold, New York, New York.
- Arbeit, D. (1990). *Introduction to GIS - Workshop Notes*, GIS/LIS 90, Anaheim, California.
- Aronoff, S. (1989). *Geographic Information Systems: A Management Perspective*, WDL Publications, Ottawa, Canada.
- Baziar, M., (1991). Engineering of permanent ground deformation due to seismically-induced liquefaction, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, p. 297.
- Bernhardsen, T. (1992). *Geographic Information Systems*, Viak IT, Ardenal, Norway.
- Boore, D.M., (1977). The motion of the ground in earthquakes. *Scientific American*, pp. 69-78.
- Boore, D.M., Joyner, W B., and Fumal, T.E., (1993). Estimation of response spectra and peak acceleration from western American earthquakes: an Interim Report, *US Geological Survey Open File Report 93-509*.
- Borcherdt, R. (1994). New development of estimating site response effects on ground motion, *Proceedings of the Seminar on New Development in Earthquake Ground Motion Estimation and Implications for Engineering Design Practice*, ATC-35, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- Campbell, K.W. and Bozornia, Y. (1994). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration from worldwide accelerograms recorded from 1957 to 1993. *Proceedings, Fifth US National conference on Earthquake Engineering*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA. Vol. 1, pp. 283-292.
- Coppersmith, K.J. and Wells, D.L., (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, No.4, pp. 974-986.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 58, pp. 1583-1606.
- Der Kiureghian, A. and Ang, A. H-S., (1977). A fault rupture model for seismic risk analysis, *Bull. Seismic. Soc. Am.*, Vol. 67, pp. 1173-1194.

- Fotheringham, S. and Rogerson, P. (1994). *Spatial Analysis and GIS: Applications in GIS*, Taylor & Francis, Washington, D.C.
- Frost, J.D. and J-L. A. Chameau (1993). *Geographic Information Systems and their Application in Geotechnical Earthquake Engineering - Workshop Proceedings*, American Society of Civil Engineers, New York, New York.
- FICCDC Technology Working Group (1988). "A Process for Evaluating Geographic Information Systems," *Technical Report 1, Open - File Report 88-105*, United States Geological Survey, Washington, D.C.
- Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K., (1986). Study of liquefaction induced permanent ground displacements in Japan, p. 87.
- Johnson, A.I., C.B. Petterson, and J.L. Fulton (1992). *Geographic Information Systems and Mapping: Practices and Standards*, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania.
- Kiremidjian, A.S. and Anagnos, T., (1984). Stochastic slip-predictable model for earthquake occurrences, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, No. 2, pp. 739-755.
- Obermeyer, N.J. (1994). *Managing Geographic Information Systems*, Guilford Press, New York, New York.
- Peuquet D.J. and Marble, D.F. (1990). *Introductory Readings in Geographic Information Systems*, Taylor & Francis, New York, New York.
- Ripple, W.J. (1989). *Fundamentals of Geographic Information Systems: A Compendium*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.
- Star, J. and J. Estes (1990). *Geographic Information Systems: An Introduction*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Taylor, D.R.F. (1991). *Geographic Information Systems: The Microcomputer and Modern Cartography*, Pergamon Press, New York, New York.
- Tomlin, C.D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Youd, T.L. and Perkins, D.M., (1987). Mapping of liquefaction severity index, *Jour. Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 113, No. 11, pp. 1374-1392.
- Youngs, R.R., (1995). The need for detailed uncertainty treatment in probabilistic seismic hazard mapping, *Proceedings of the National Earthquakes Ground Motion Mapping Workshop*, ATC-35-2, Applied Technology Council, Redwood City, CA.

- Youngs, R.R. and Coppersmith, K. J., (1985). Implications of fault slip rates and earthquakes recurrence models for probabilistic seismic hazard assessment, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol 75, No. 4, pp. 939-964.

# Figuras

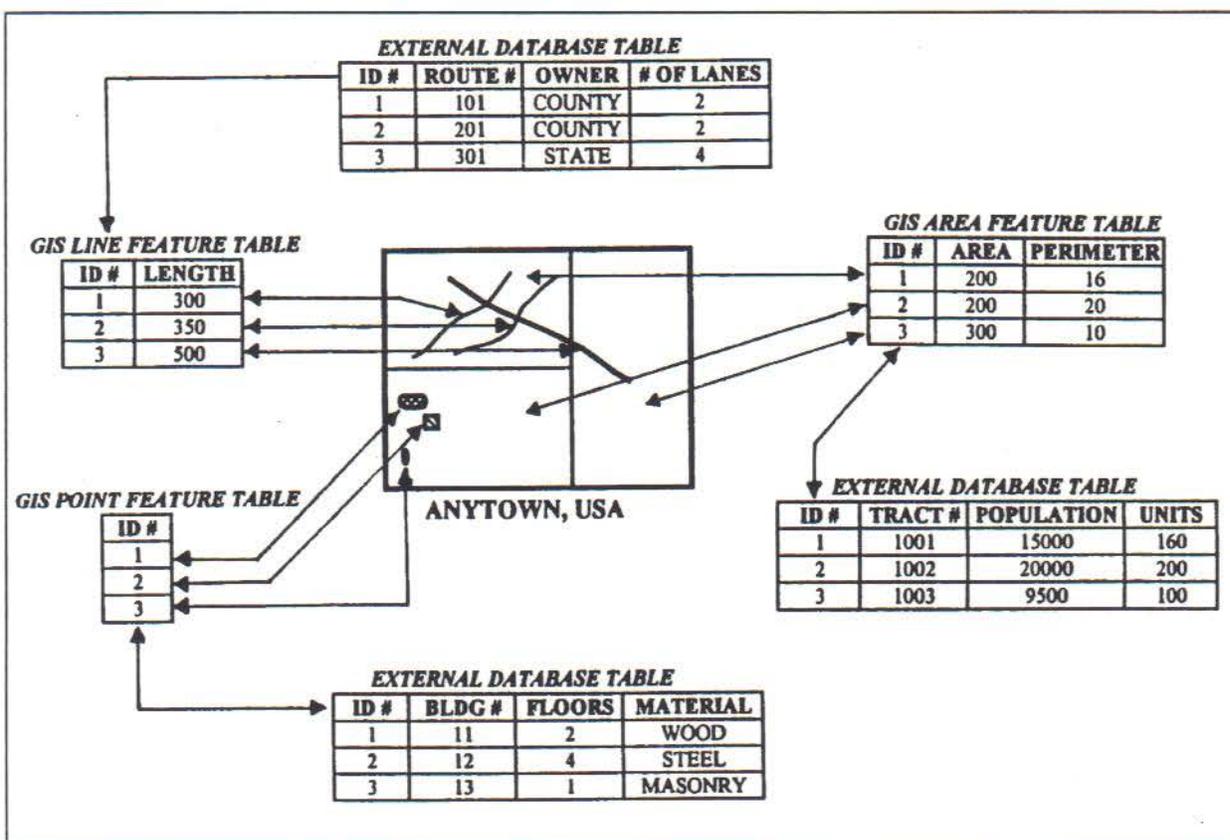


Figura 1.1 Ejemplo de enlace de datos dentro del ambiente SIG.

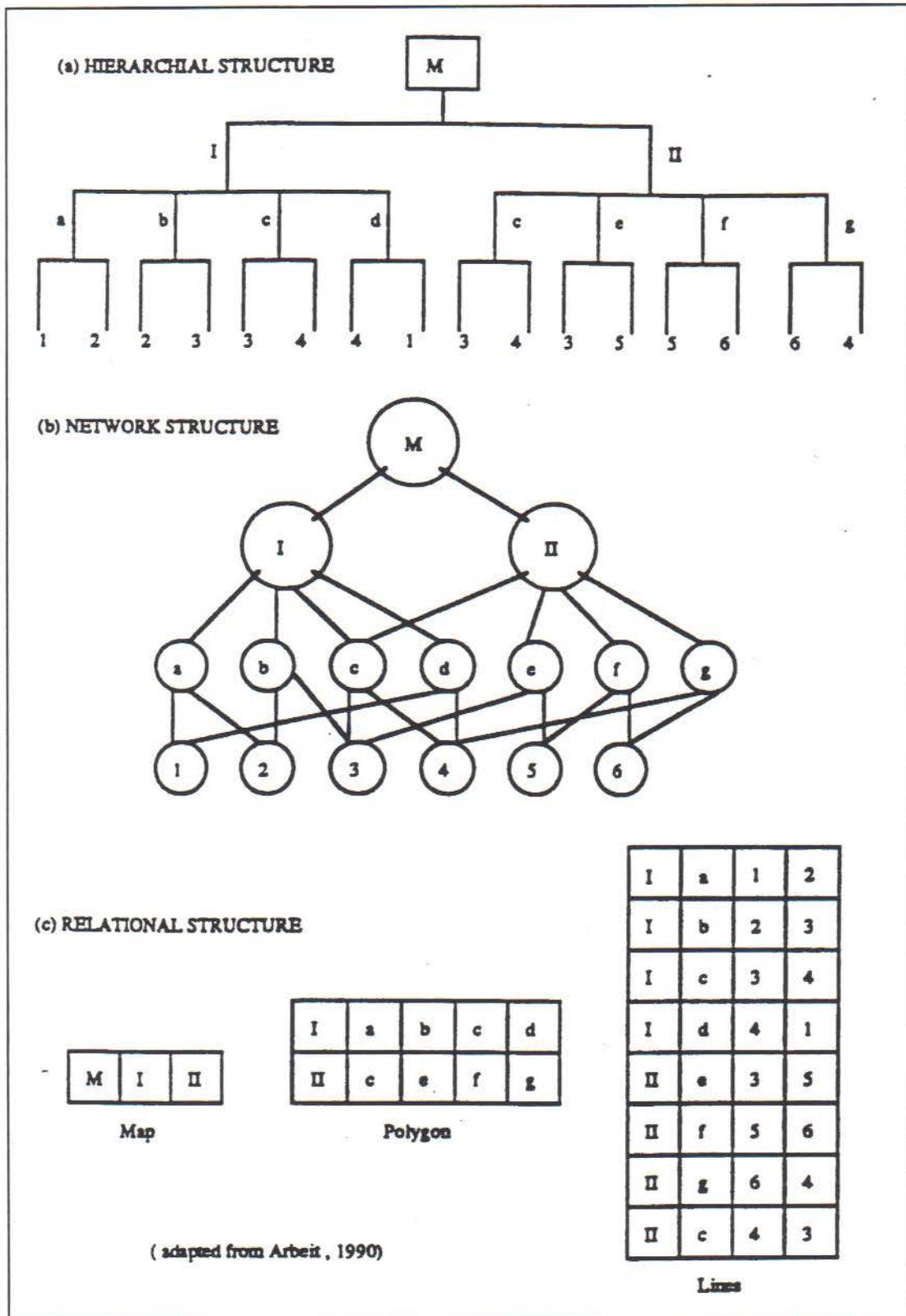


Figura 1.2 Tres tipos de estructuras de datos.

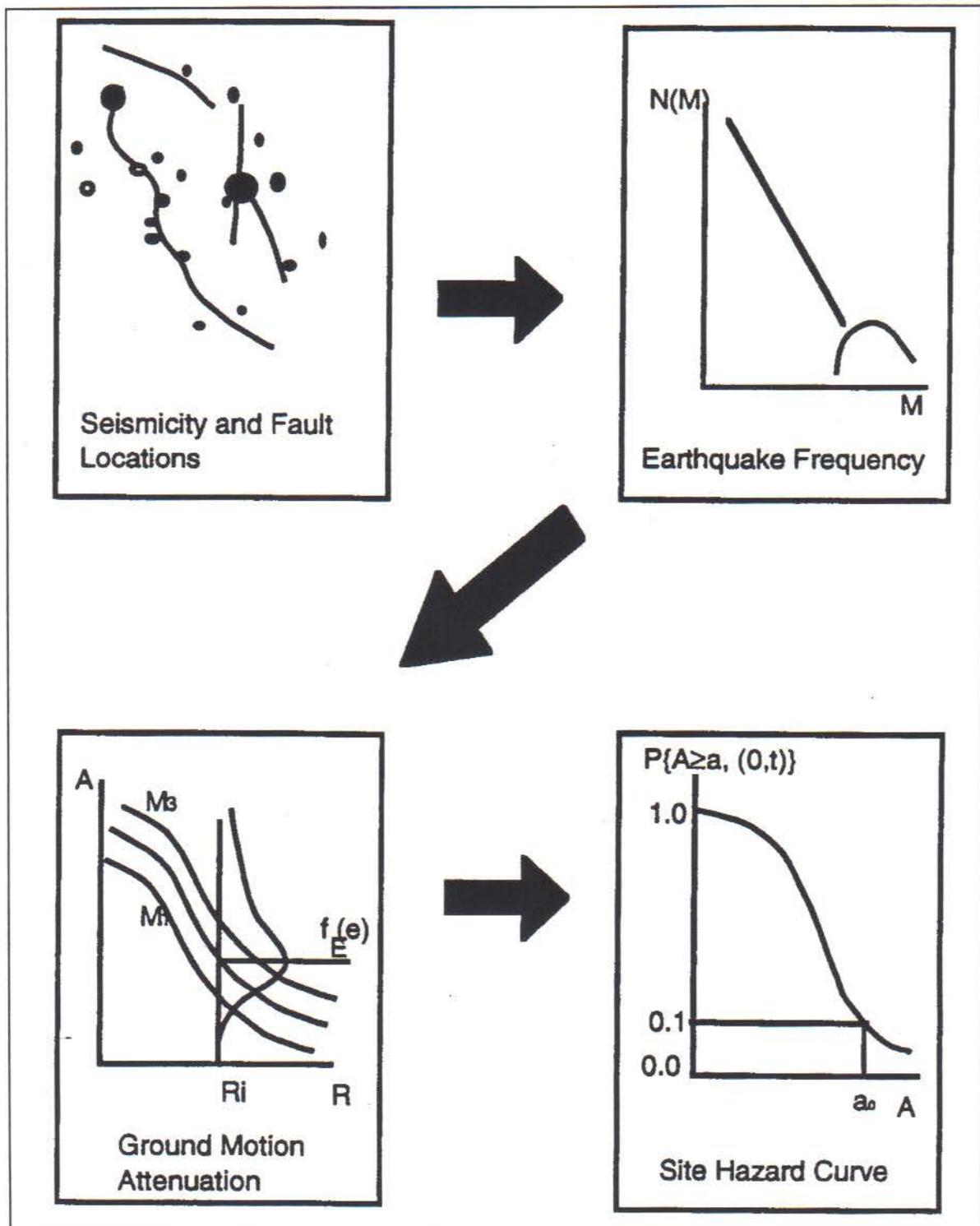


Figura 2.1 Pasos de un análisis probabilístico de amenaza sísmica.

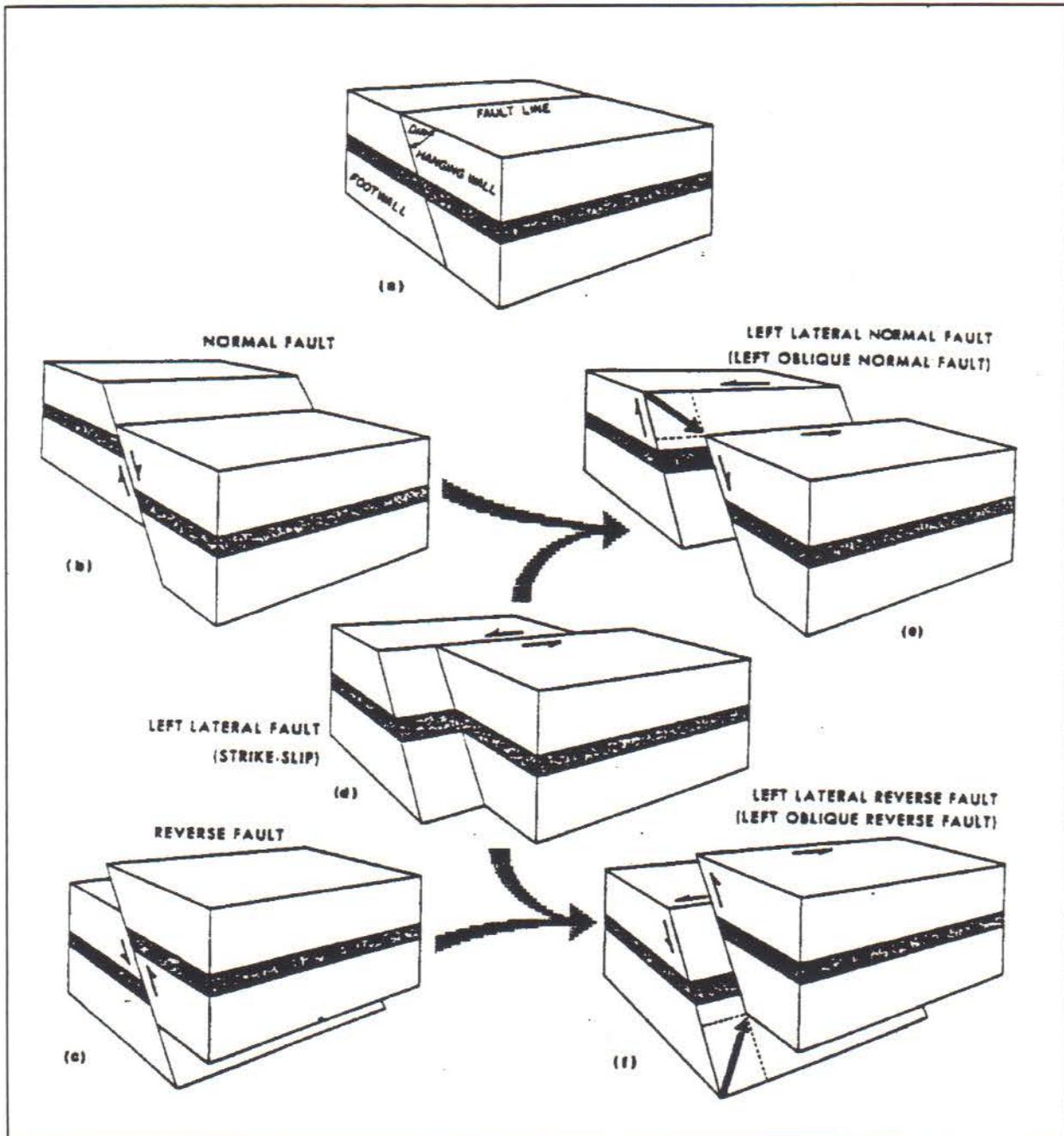
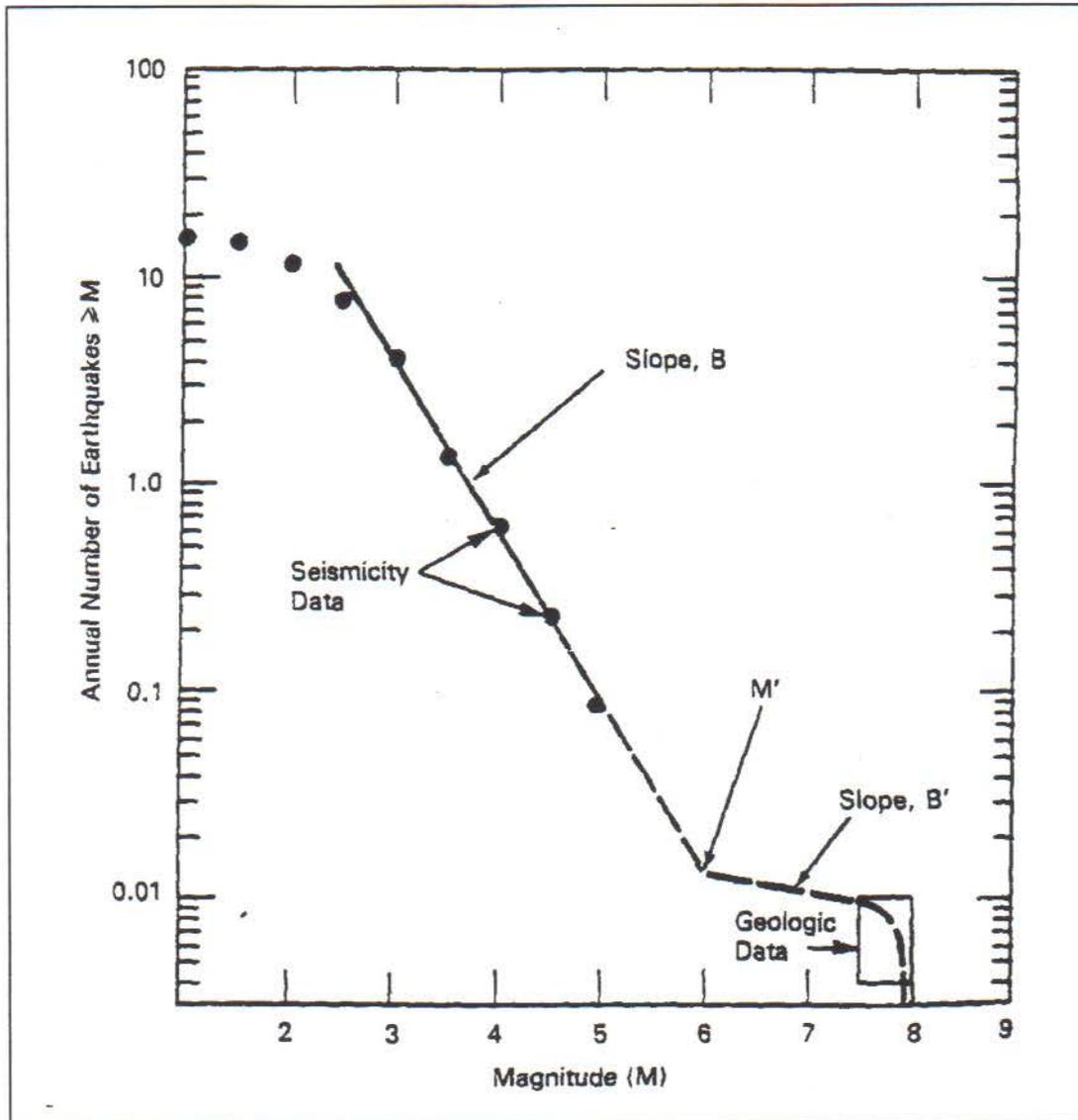


Figura 2.2 Tipos de fallas (Según Boore, 1977)



**Figura 2.3** Ejemplo de relaciones de recurrencia. (Según Youngs & Coppersmith, 1985).

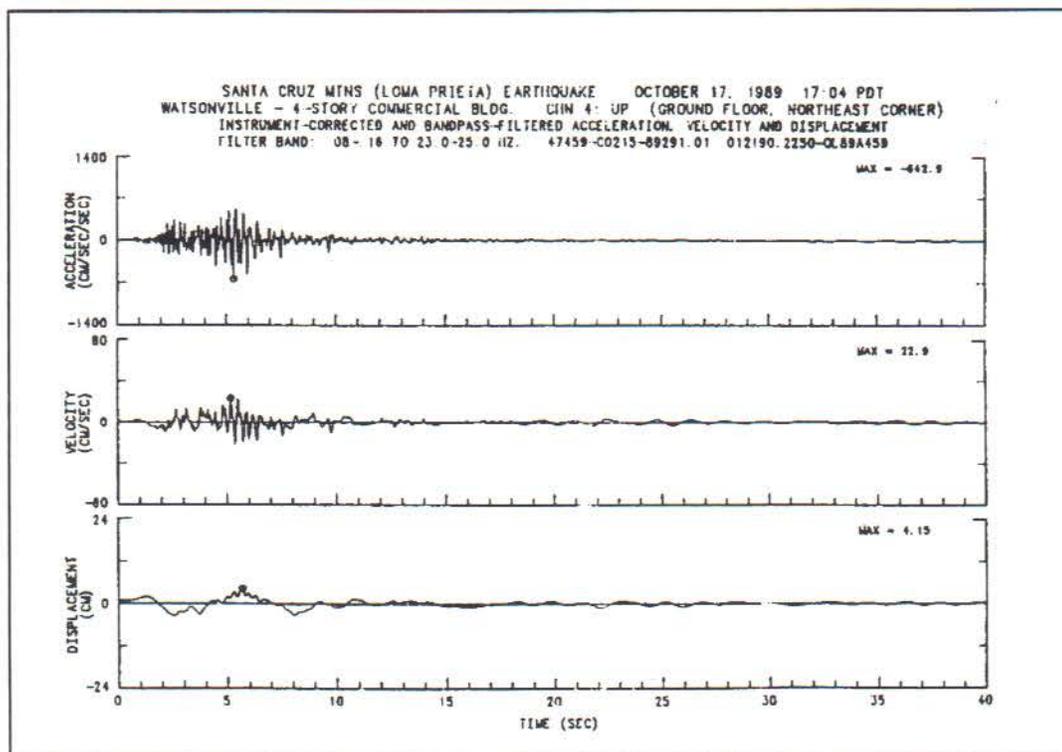


Figura 2.4 Ejemplos de acelerogramas registrados.

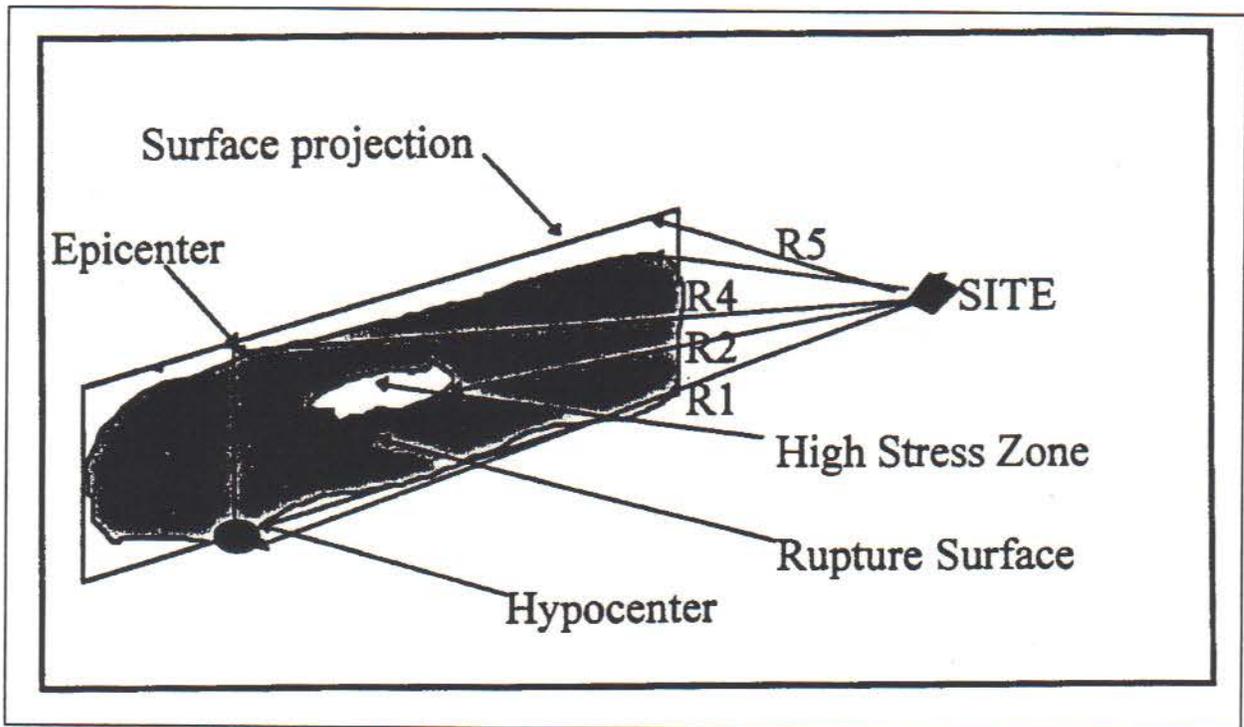


Figura 2.5 Diferentes definiciones de distancia de la fuente al sitio. (Según Joyner & Boore, 1988)

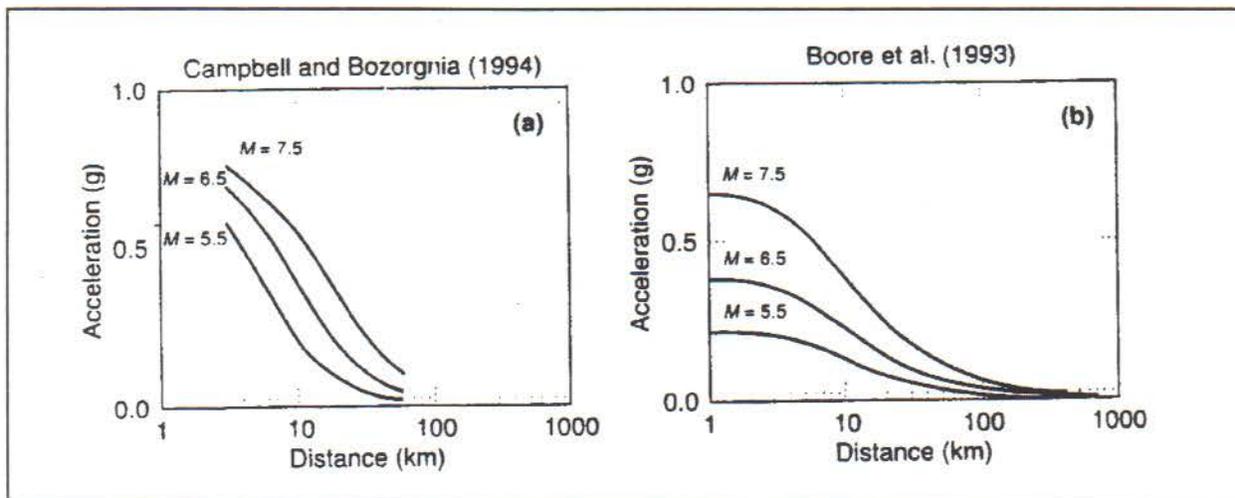


Figura 2.6 Ejemplo de funciones de atenuación para aceleración pico horizontal vs. distancia para  $M=5.5, 6.5$  y  $7.5$ .

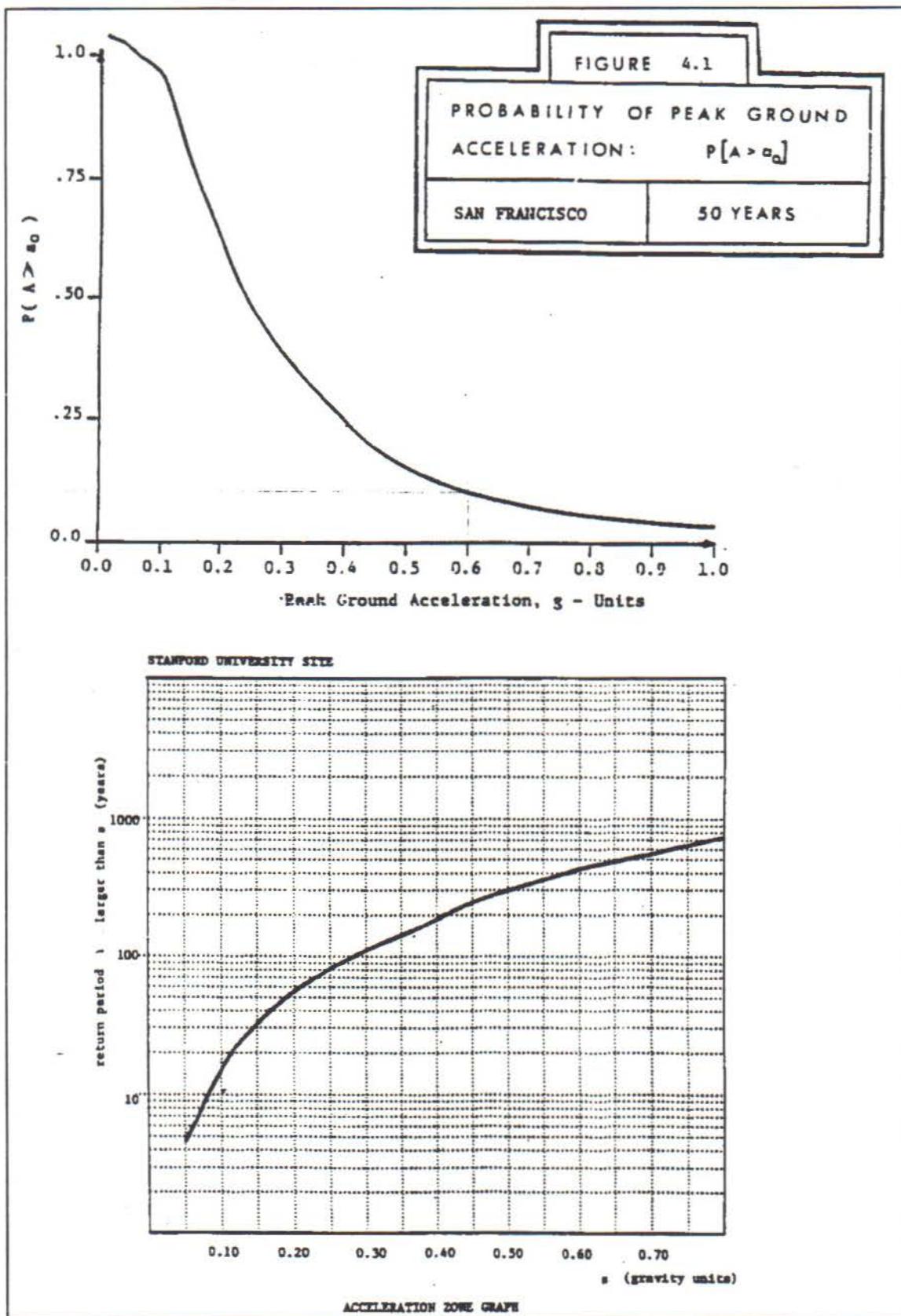


Figura 2.7 Ejemplo de curvas de amenaza para una localidad.

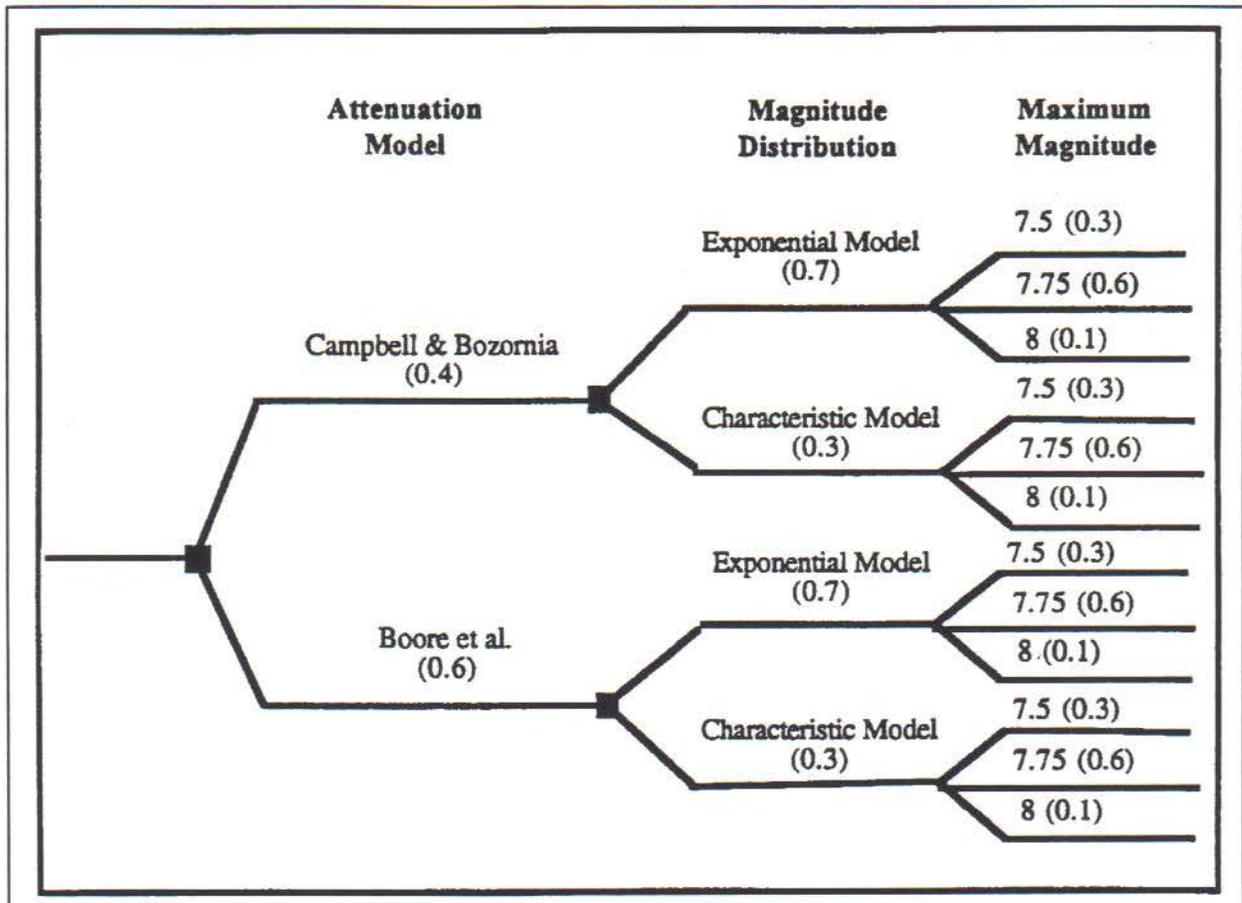


Figura 2.8 Representación de árbol lógico para incertidumbres.

Nombre	Descripción General	Velocidad de Onda Cortante (m/s)		
		Mínima	Promedio	Máxima
<b>A<sub>0</sub></b>	<b>ROCA</b> e.g., roca metamórfica con fracturas muy espaciadas	1400	1620	
<b>A</b>	<b>DE SUELO FIRME A ROCA</b> e.g., granitos, rocas ígneas, conglomerados, areniscas con fracturas muy espaciadas	700	1050	1400
<b>B</b>	<b>GRAVAS Y ROCAS DE FIRME A SUAVE</b> e.g., rocas ígneas y sedimentarias suaves, areniscas, gravas y suelos con más de 20% de grava	375	540	700
<b>C</b>	<b>ARCILLAS FIRMES A SUELOS ARENOSOS</b> e.g. arenas de sueltas a muy densas, arcillas arenosas y arcillas de medianamente firmes a duras y arcillas limosas (N>15 golpes/m)	200	290	375
<b>D</b>	<b>SUELOS BLANDOS</b> D1. Suelos Blandos sin Estudio Especial, e.g., rellenos sueltos sumergidos y arcillas de muy suaves a suaves y arcillas limosas (N<15 golpes/m) D2. Suelos Blandos con Estudio Especial, e.g., suelos licuables, arcillas altamente sensibles, arcillas altamente orgánicas, arcillas de alta plasticidad (PI>75%), y suelos blandos de más de 37 metros	100	150	200

Figura 2-9 Tipos de Sitios según la Amplificación Sísmica en los Suelos. (según Borchardt, 1994).

S <sub>a</sub> (g)	Períodos Espectrales (segundos)	
	0.1 a 0.5	0.75 a 4.0
≤ 0.1	0.35	0.65
0.2	0.25	0.60
0.3	0.10	0.53
≥ 0.4	- 0.05	0.45

Figura 2.10 Valores para el exponente de amplificación sísmica  $m_{TI}$ .



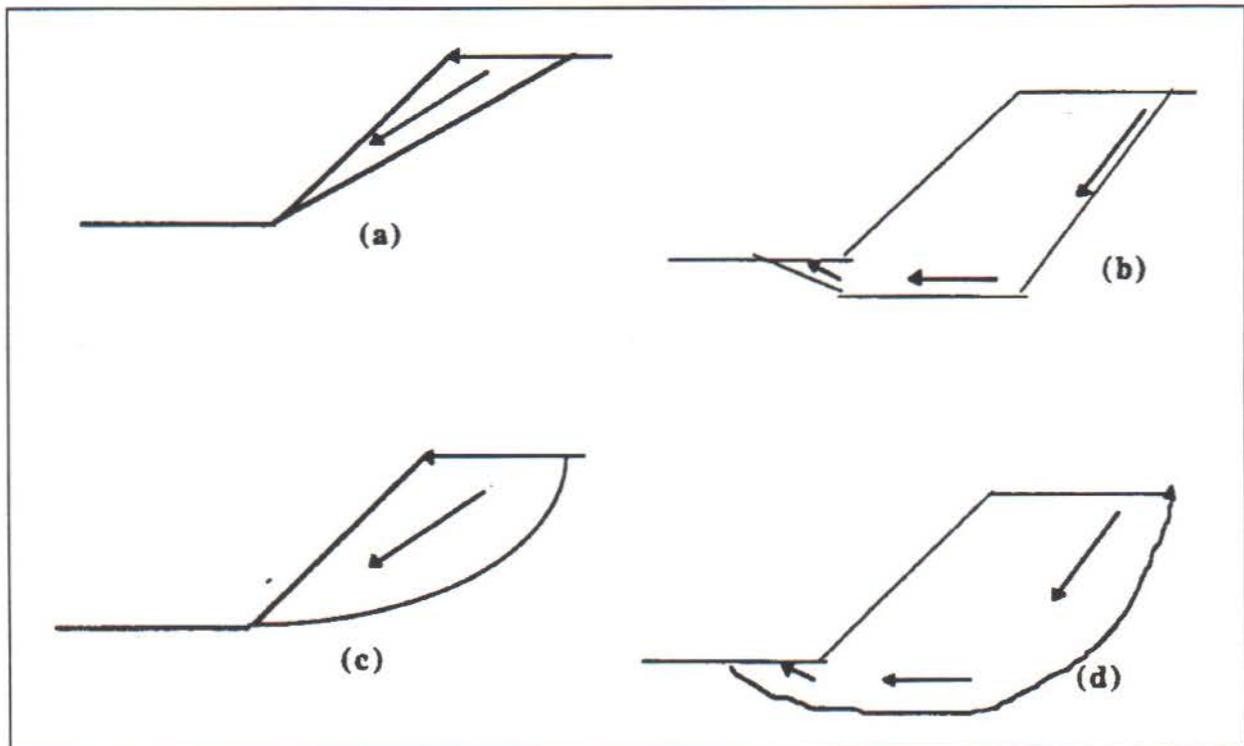


Figura 2.12 Modelos típicos de falla superficial: a) plana; b) multiplanar; c) circular; d) no-circular.

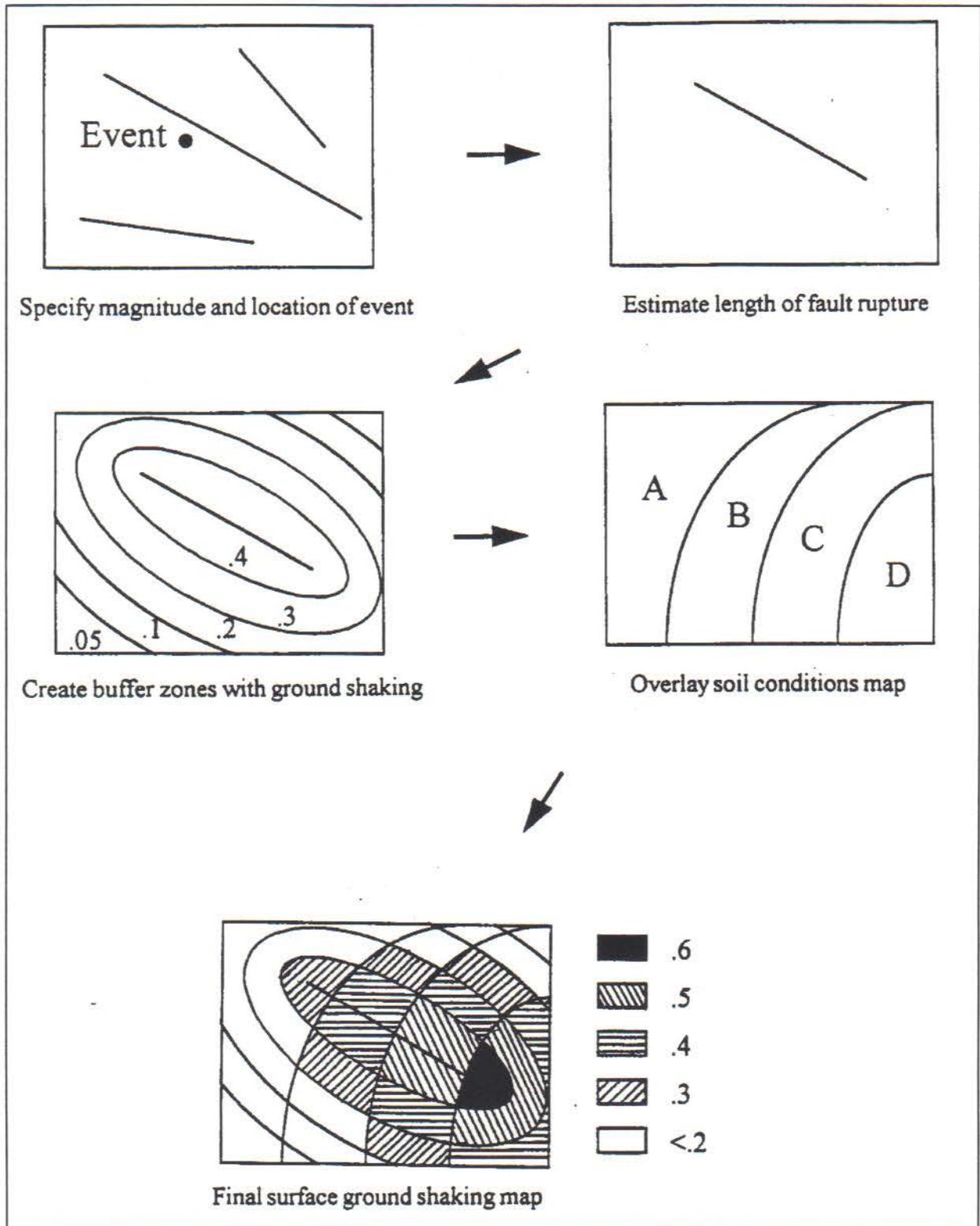


Figura 3.1 Modelaje del movimiento del suelo en SIG vectorial.

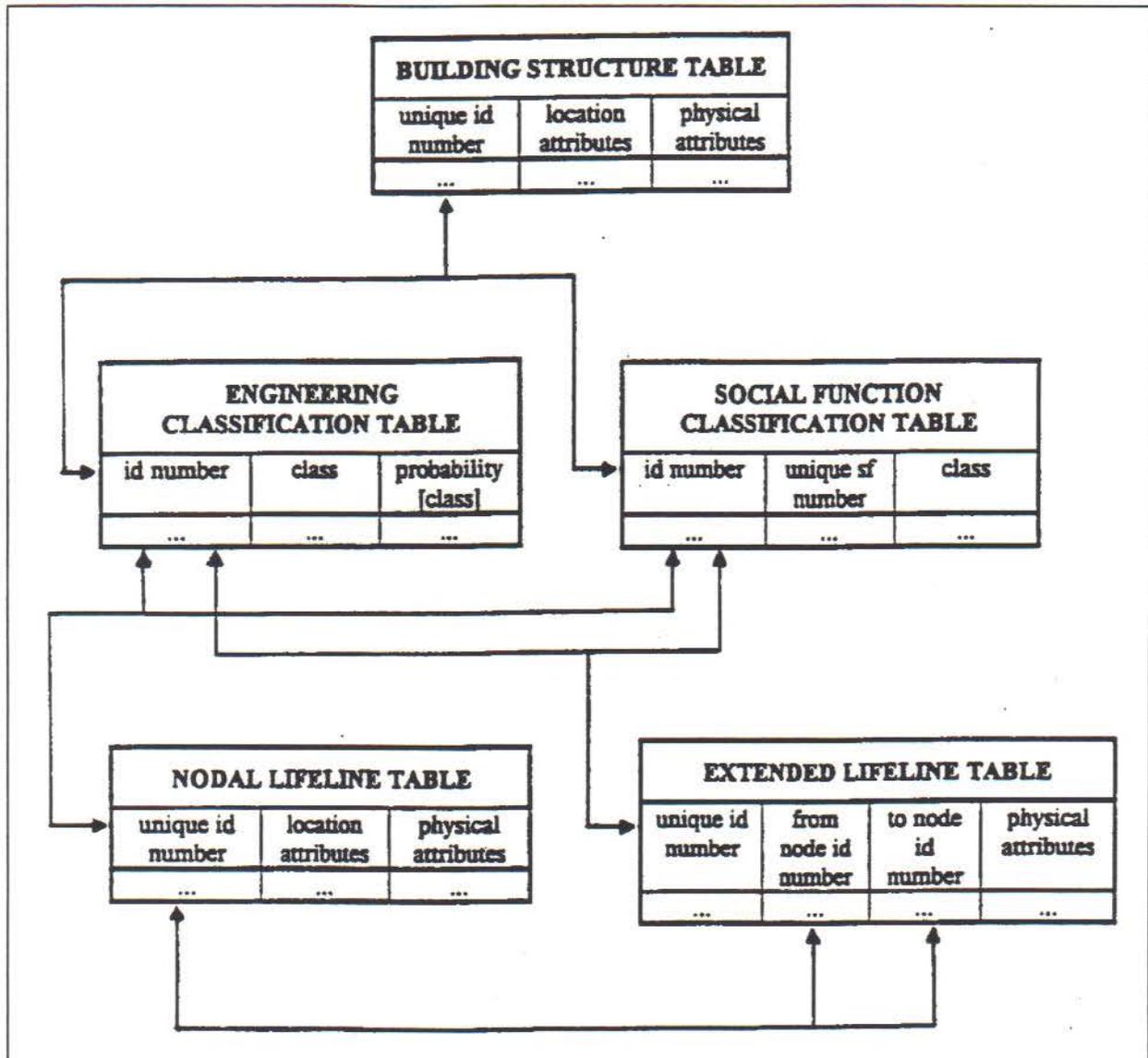


Figura 4.1 Ejemplo simplificado de tablas interrelacionadas en un inventario de instalaciones.

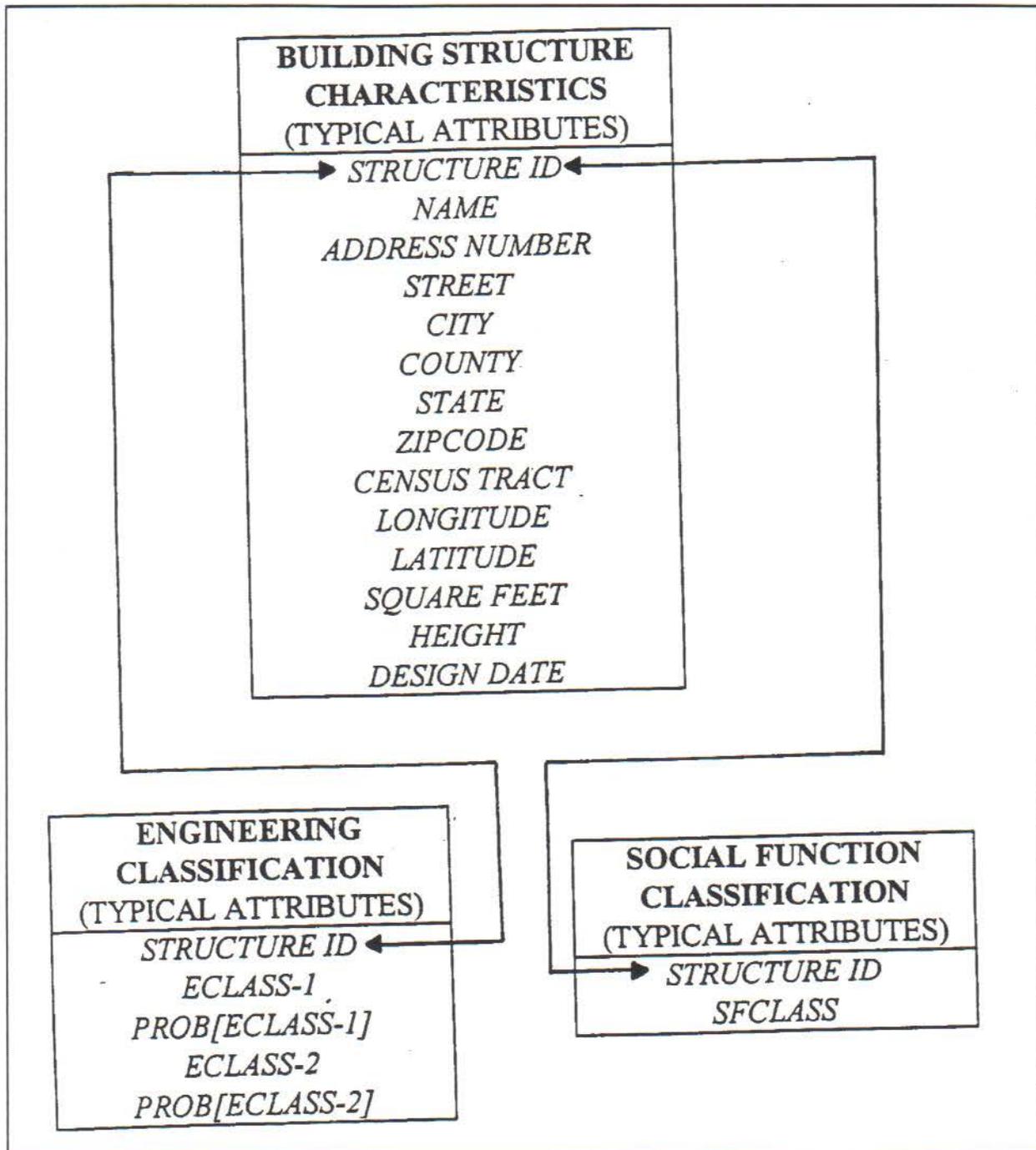


Figura 4.2 Ejemplo de tablas de bases de datos interrelacionadas.

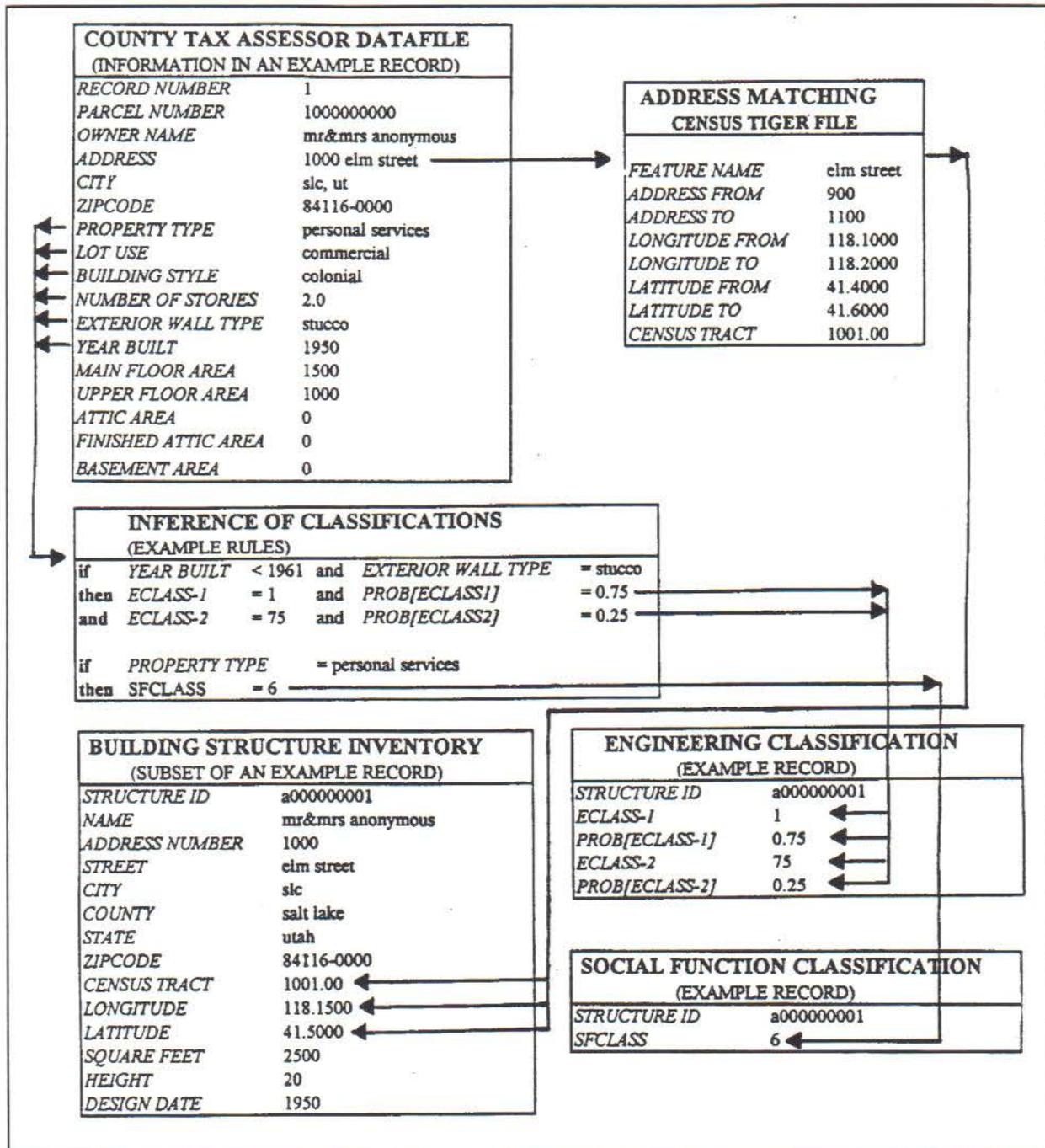


Figura 4.3 Ejemplo de reglas de inferencia y procesos de geocodificación.

Factor Central de Daño %	Probabilidades de Daño para un MMI dado						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0.0	18.9	0.6					
0.5	60.4	29.2	2.6				
5	20.7	70.2	90.3	54.4	15.5	1.2	
20			7.1	45.6	82.9	64.1	40.4
45					1.6	34.7	77.3
80							2.3
100							

Figura 5.1 Matriz de Probabilidades de Daño para estructuras de marcos de acero de poca altura (Tomado del ATC-13, 1985).

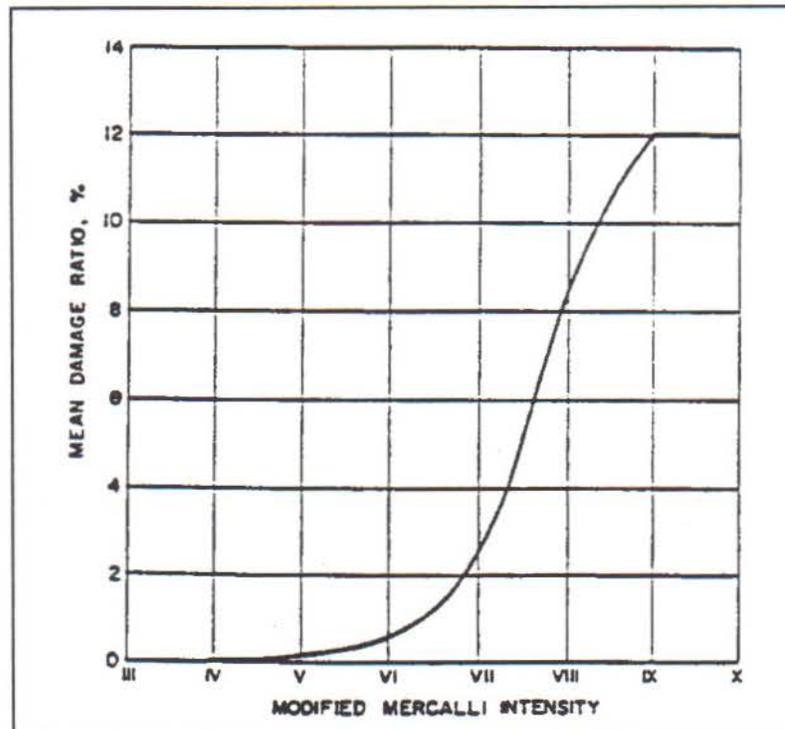


Figura 5.2 Tasa de daño medio como una función de la Intensidad de Mercalli Modificada para viviendas de madera en San Francisco, California. (Según Steinbrugge et al., 1969).

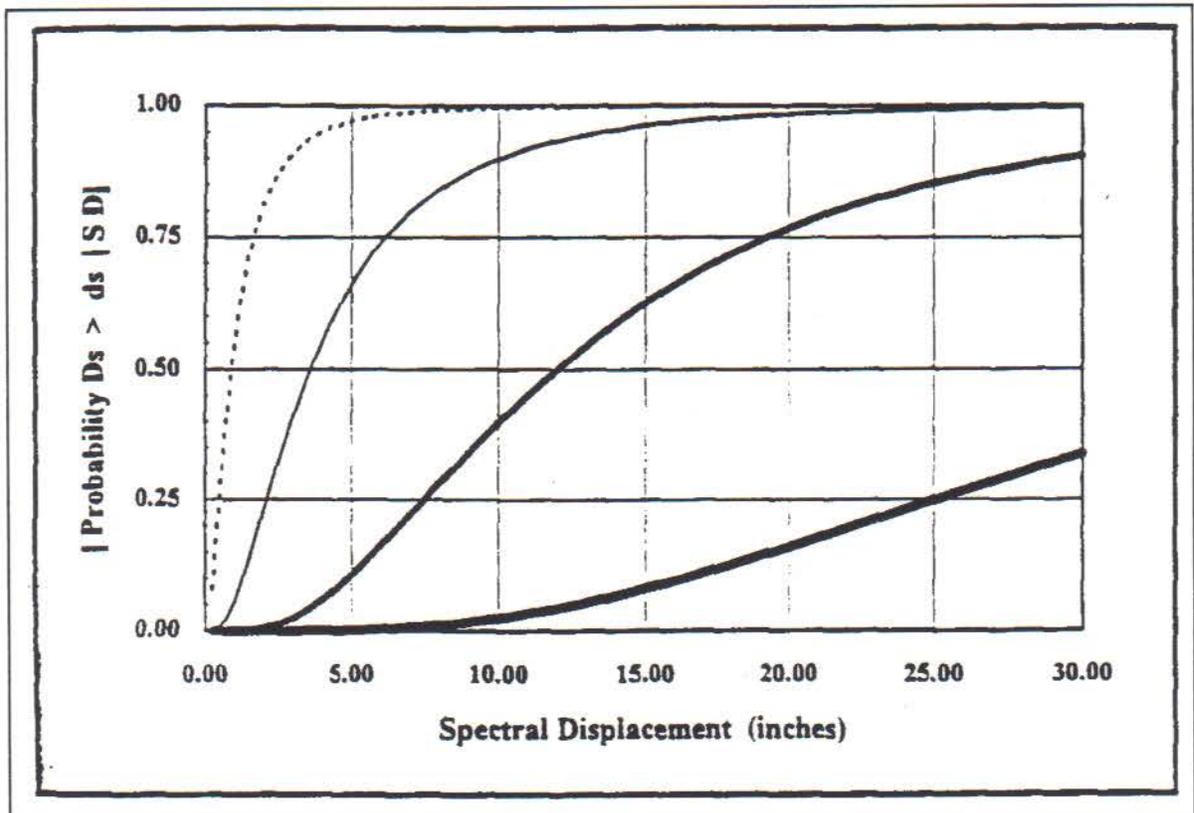


Figura 5.3 Curvas de fragilidad para estructuras bajas a base de muros de concreto. (Según NIBS, 1995).

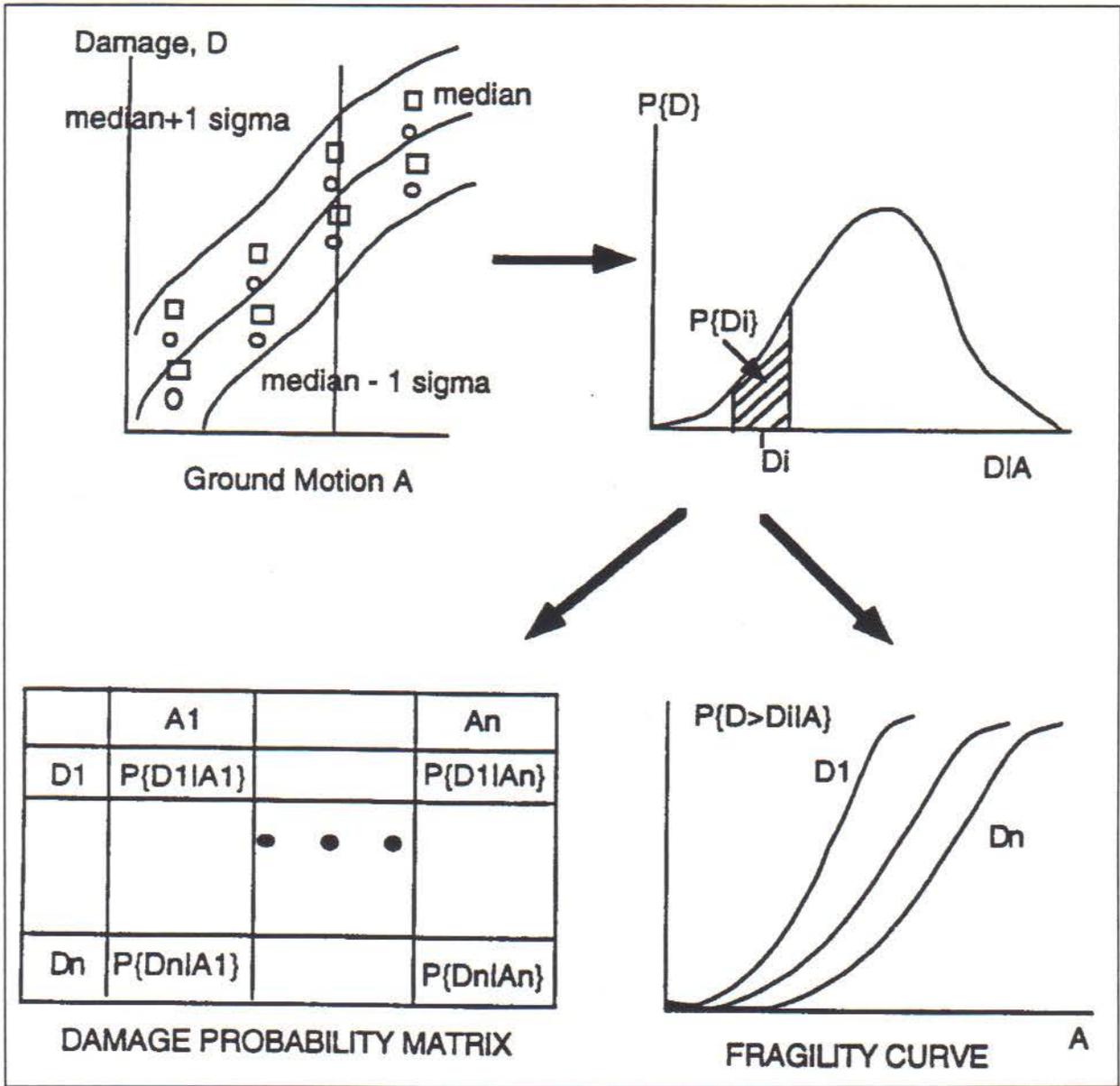


Figura 5.4 Desarrollo de relaciones heurísticas de daño por movimiento.

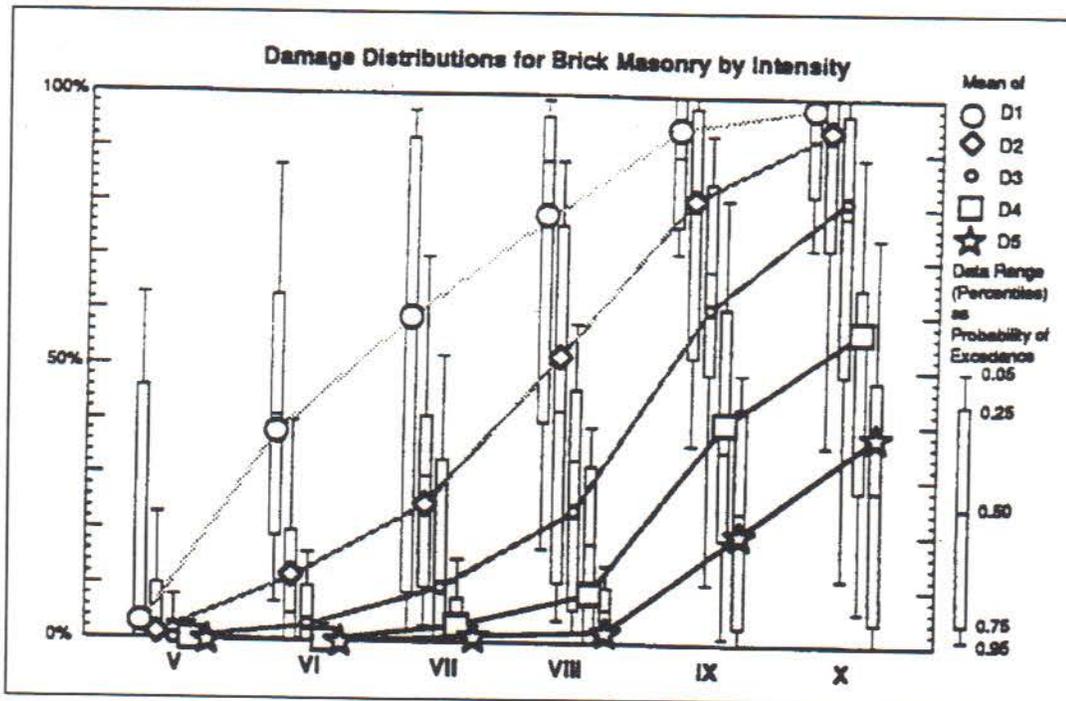


Figura 5.5 Distribución de daños para edificios de mampostería como funciones de MMI con bandas de incertidumbre. (Según Coburn & Spence, 1992).

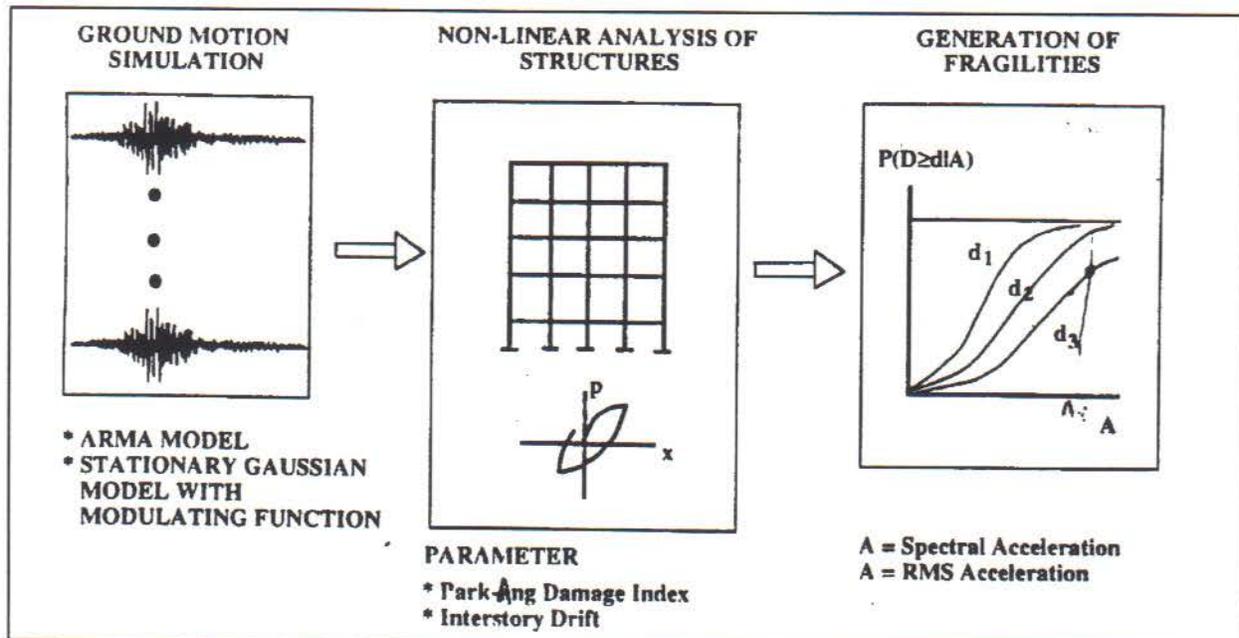


Figura 5.6 Enfoque general para el desarrollo de funciones analíticas de fragilidad. (Según Singhal & Kiremidjian, 1995)

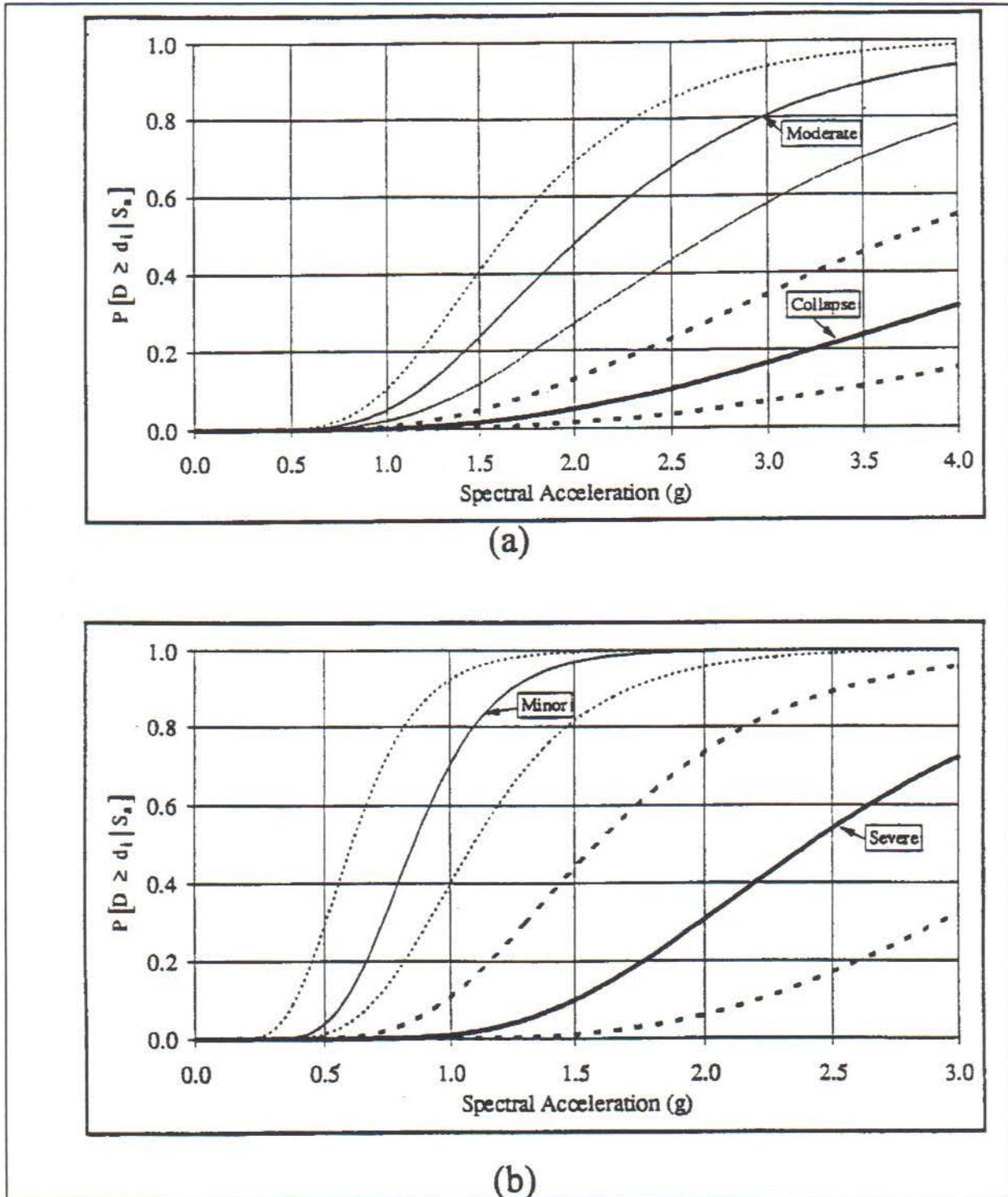


Figura 5.7 Curvas analíticas de fragilidad para edificios a base de marcos de concreto de a) baja altura y b) mediana altura con cotas de incertidumbre de 90%. (Según Singhal & Kiremidjian, 1996).

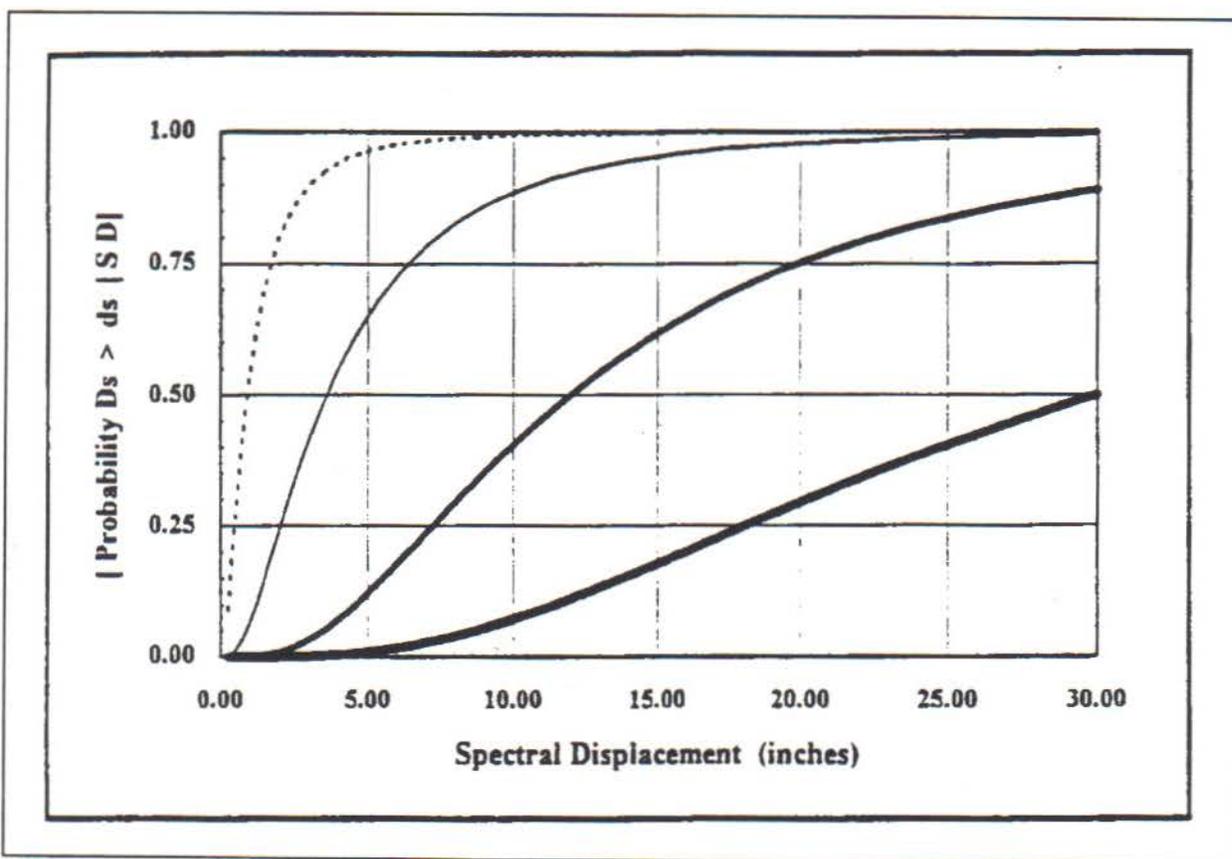


Figura 5.8a Curvas de fragilidad para componentes no-estructurales en edificios a base de muros de concreto de mediana altura. (Según NIBS, 1995).

#### Matriz de Probabilidad de Daño

Estado de Daños	Desplazamiento Espectral									
	0.5"	1.0"	1.5"	2.0"	3.0"	5.0"	10"	15"	20"	30"
Ninguno	0.73	0.46	0.3	0.2	0.1	0.04	0.01	0	0	0
Poco	0.26	0.48	0.55	0.55	0.48	0.31	0.11	0.05	0.02	0.01
Moderado	0.01	0.07	0.15	0.24	0.38	0.53	0.48	0.34	0.23	0.1
Extenso	0	0	0	0.01	0.03	0.11	0.33	0.44	0.46	0.39
Total	0	0	0	0	0	0.01	0.07	0.18	0.29	0.5

Figura 5.8b Curvas de Fragilidad para componentes no estructurales en edificios de cortante de mediana altura (Tomado de NIBS, 1995)

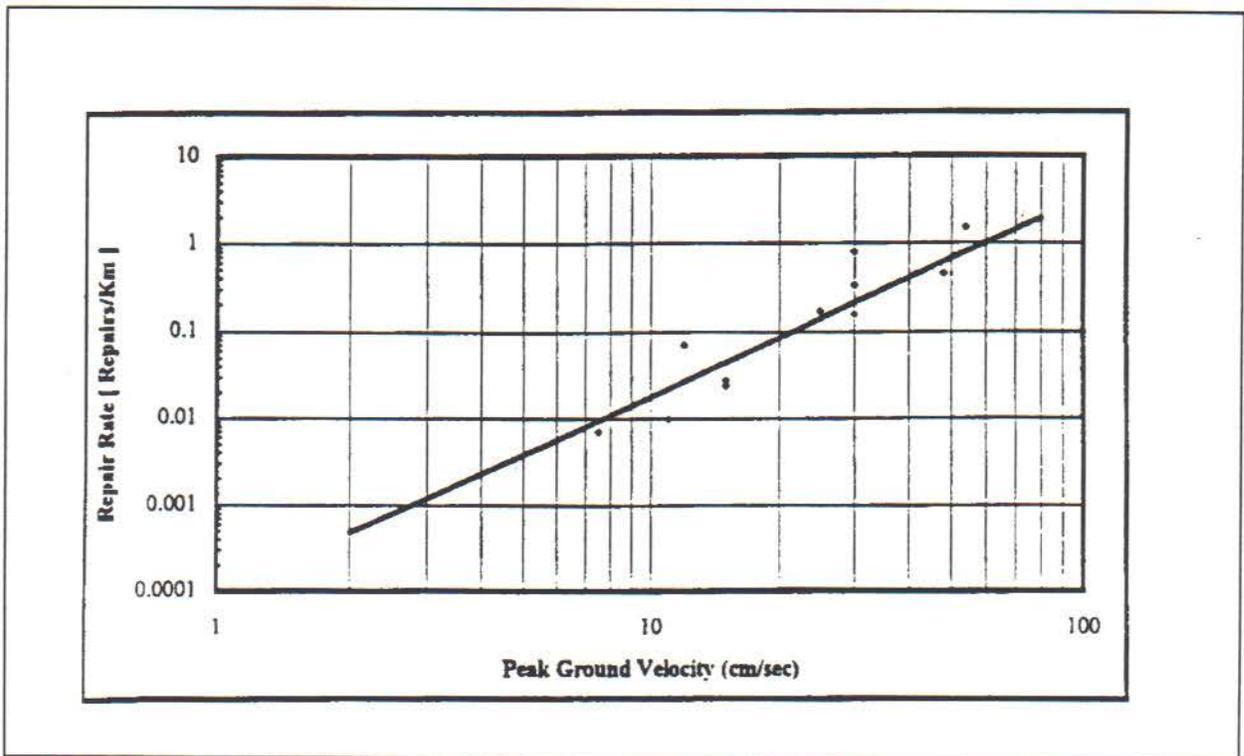


Figura 5.9 Tasa de reparación para tuberías frágiles después de un terremoto. Datos provenientes de cuatro sismos ocurridos en U.S.A. y dos en México. (Según O'Rourke & Ayala, 1990).

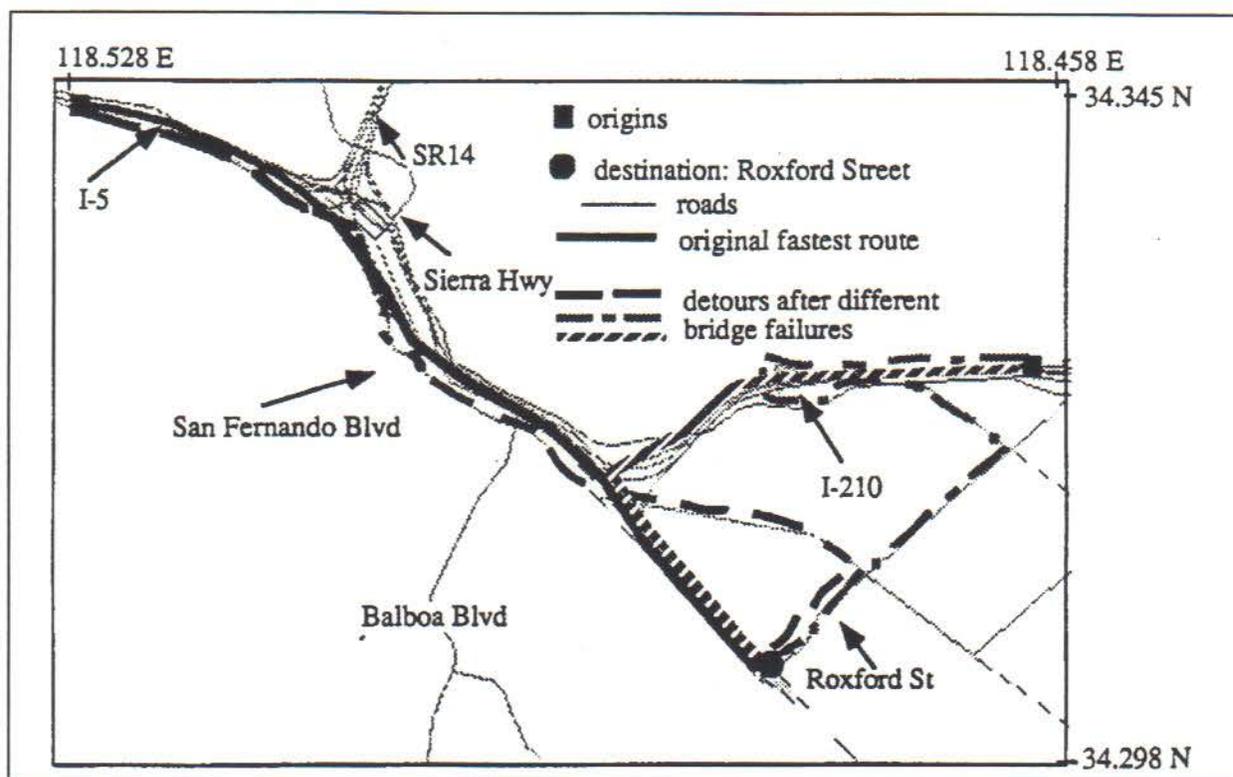


Figura 5.10 Ejemplo de análisis de red para la conectividad del sistema de transporte con diferentes colapsos de puentes. (Según Basoz & Kiremidjian, 1996).

Tipo de Instalaciones y Ubicación	Factor de Daño Medio (Ruptura de Falla), MDF(FR), en porcentaje para diferentes Desplazamientos de Falla				
	0.2 m	0.6 m	1.0 m	3.5 m	10 m
Estructuras Bajo Tierra					
En Zona de Falla	50	80	100	100	100
En Zona de Distorsión	20	40	60	80	100
Estructurales Superficiales					
En Zona de Falla	10	30	70	100	100
En Zona de Distorsión	0	0	2	10	20

\* Estimaciones basadas en la opinión de PEP; factor de daño medio para ruptura de falla es aditivo al factor de daño medio por sismo, con  $MDF_{max} = 100\%$ .

Figura 5.11 Factor de Daño Medio para diferentes valores de Desplazamientos Diferenciales de Falla. (Tomado de ATC-13, 1985)

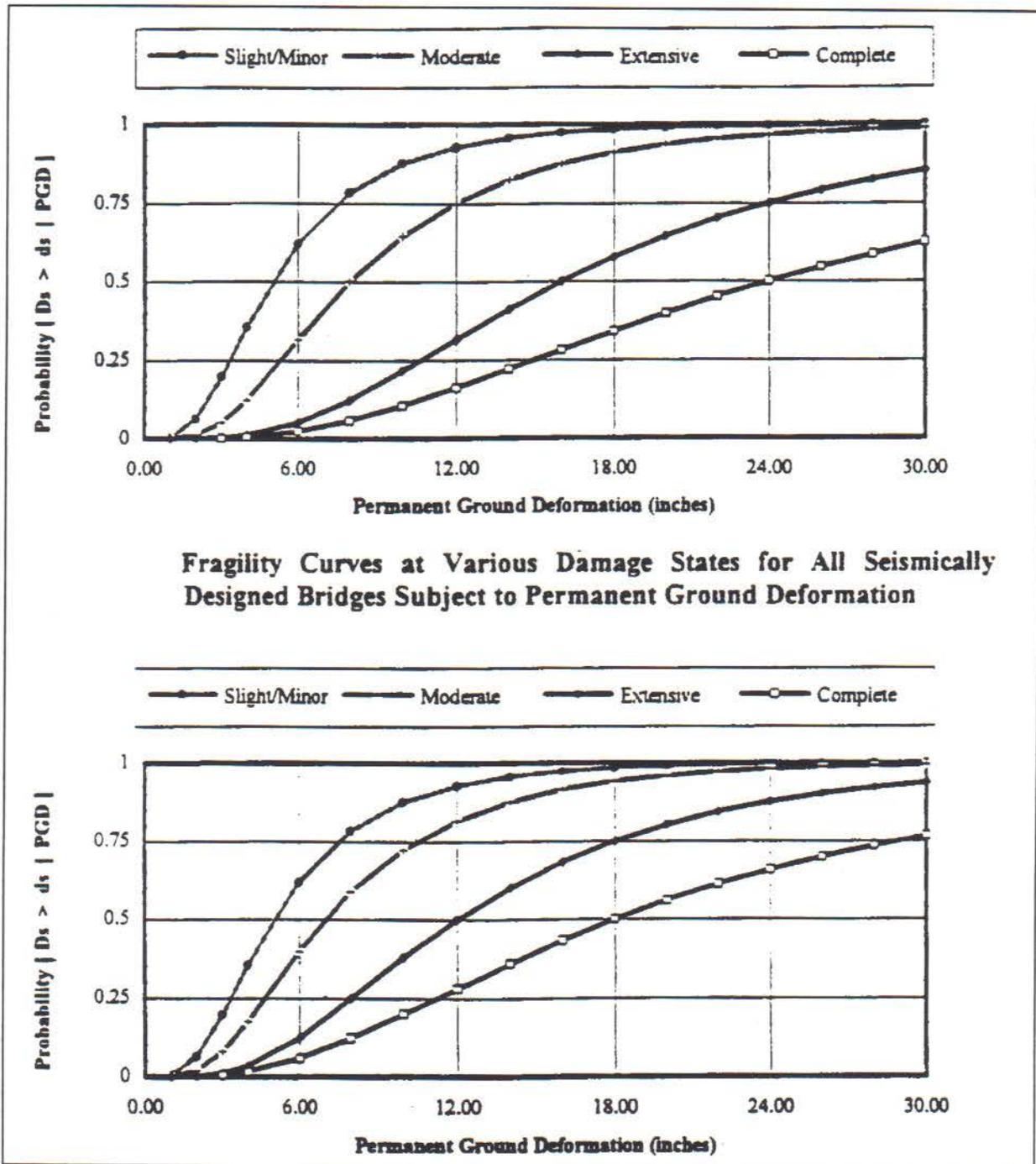


Figura 5.12 Curvas de fragilidad para varios estados de daño para puentes diseñados convencionalmente, sujetos a deformaciones permanentes del suelo.

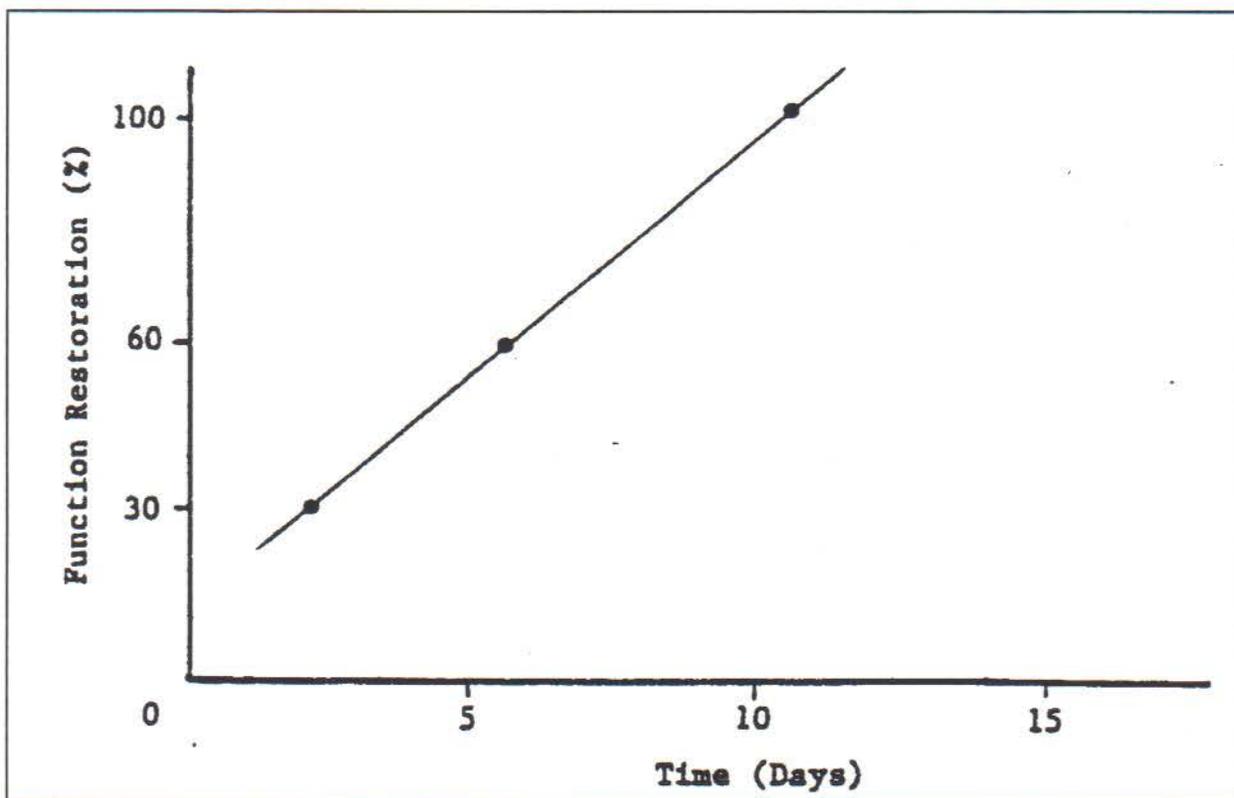


Figura 5.13 Curva de restauración de funcionalidad para residencias en Nivel de Daño 4. (Tomado de ATC-13, 1985).

Nivel de severidad de lesión	Descripción de lesión
Nivel 1	Lesiones que requieren atención médica básica sin hospitalización.
Nivel 2	Lesiones que requieren de mayor grado de cuidado médico y hospitalización, pero no conducente a peligro de muerte.
Nivel 3	Lesiones que plantean una condición inmediata de peligro de muerte si no son tratadas en forma adecuada y expedita. La mayoría de estas lesiones son el resultado de colapso estructural y el subsecuente atrapamiento o inmovilización de los ocupantes.
Nivel 4	Muerte instantánea o lesión mortal.

Figura 5.14 Escala de clasificación de lesiones. (Tomado de NIBS, 1995)

Tabla 10-3	Tasas de lesión y mortalidad*				
Estado de daño	CDF (%)	Número de pisos	Fracción de lesiones menores	Fracción de lesiones severas	Fracción de mortalidad
1	0	1+	0	0	0
2	0.5	1+	1/25,000	3/10,000	1/100,000
3	5	1+	1/12,500	3/5,000	1/50,000
4	20	1+	1/2,500	3/1,000	1/10,000
5	45	1	5/250	3/300	1/1,000
5	45	2+	1/25	1/5	1/500
6	80	1	2/25	3/10	1/100
6	80	2+	4/25	3/5	1/50
7	100	1	3/5	1/5	1/5
7	100	2+	3/5	0	2/5

\*Para construcción liviana en acero o marcos de madera, multiplicar por 0.1.

Figura 5.15 Tasas de lesión y mortalidad. (Tomado de ATC-36, 1996)

#	Tipo de Edificación	Nivel de Víctimas			
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
1	W1	3/50.000	1/100.000	1/1.000.000	1/1.000.000
2	W2	3/50.000	1/100.000	1/1.000.000	1/1.000.000
3	S1L	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
4	S1M	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
5	S1H	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
6	S2L	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
7	S2M	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
8	S2H	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
9	S3	3/50.000	1/100.000	1/1.000.000	1/1.000.000
10	S4L	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
11	S4M	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
12	S4H	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
13	S5L	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
14	S5M	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
15	S5H	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
16	C1L	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
17	C1M	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
18	C1H	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
19	C2L	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
20	C2M	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
21	C2H	3/5.000	1/10.000	1/500.000	1/500.000
22	C3L	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
23	C3M	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
24	C3H	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
25	PC1	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
26	PC2L	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
27	PC2M	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
28	PC2H	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
29	RM1L	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
30	RM1M	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
31	RM2L	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000

32	RM2M	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
33	RM2H	1/1.000	1/5.000	1/50.000	1/50.000
34	URML	3/1.000	1/2.500	1/20.000	1/20.000
35	URMM	3/1.000	1/2.500	1/20.000	1/20.000
36	MH	1/1.000	1/10.000	1/100.000	1/150.000
B1	Puente Grande	n/d	n/d	n/d	n/d
B2	Puente Continuo	n/d	n/d	n/d	n/d
B3	Puente Simple	n/d	n/d	n/d	n/d

**Figura 5.16** Tasas de víctimas para diferentes clases de edificaciones en estado de daño moderado (Tomado de NIBS, 1995).

(a) Ejemplo de almacenamiento en bases de datos para curvas de daño esperadas.

**TABLA PARA MMI VI**

TIPO	% DAÑOS
1	4
2	6.8
3	5.5
...	...

**TABLA PARA MMI XII**

TIPO	% DAÑOS
1	48.4
2	60.2
3	54.3
...	...

(b) Ejemplo de almacenamiento en bases de datos para matrices de probabilidad de daños.

**TABLA PARA MMI VI**

TIPO	P[DS 1]	P[DS 2]	P[DS 3]	P[DS 4]	P[DS 5]	P[DS 6]	P[DS 7]
1	30.5	65.1	4.4	0	0	0	0
2	20.2	54.3	16.7	8.8	0	0	0
3	18.9	60.4	20.7	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...

(c) Ejemplo de almacenamiento de bases de datos para curvas de fragilidad.

**TABLA PARA CLASE 1**

PGA	P[DS 1]	P[DS 2]	P[DS 3]	P[DS 4]	P[DS 5]	P[DS 6]	P[DS 7]
0.01	85.1	10.5	4.4	0	0	0	0
0.02	83.1	11.5	5.4	0	0	0	0
0.03	81.5	12.3	5.1	1.1	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...

**Figura 6.1** Esquemas de almacenamiento para datos de el movimiento vs. daño.

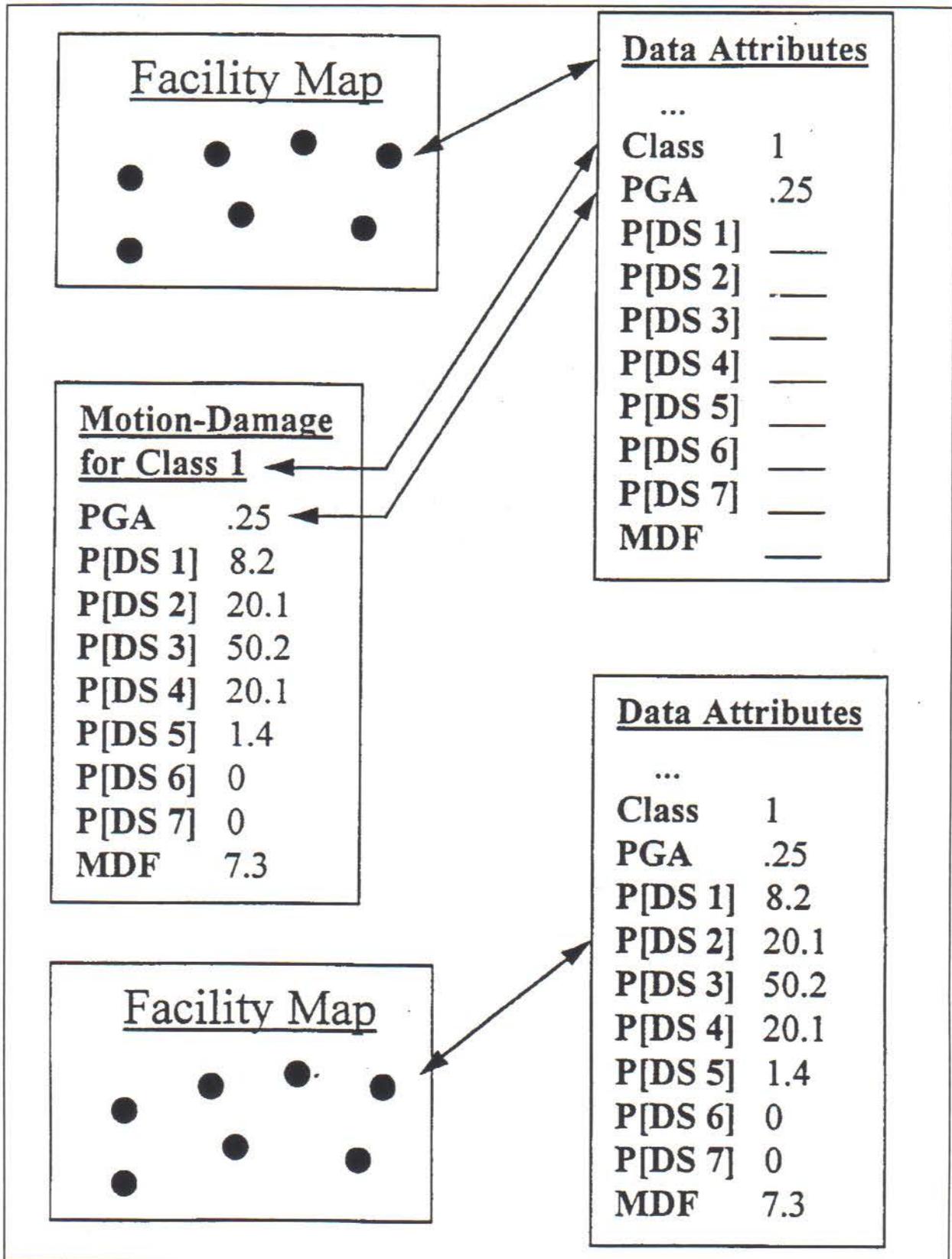


Figura 6.2 Ejemplo de cálculo de daño mediante SIG.

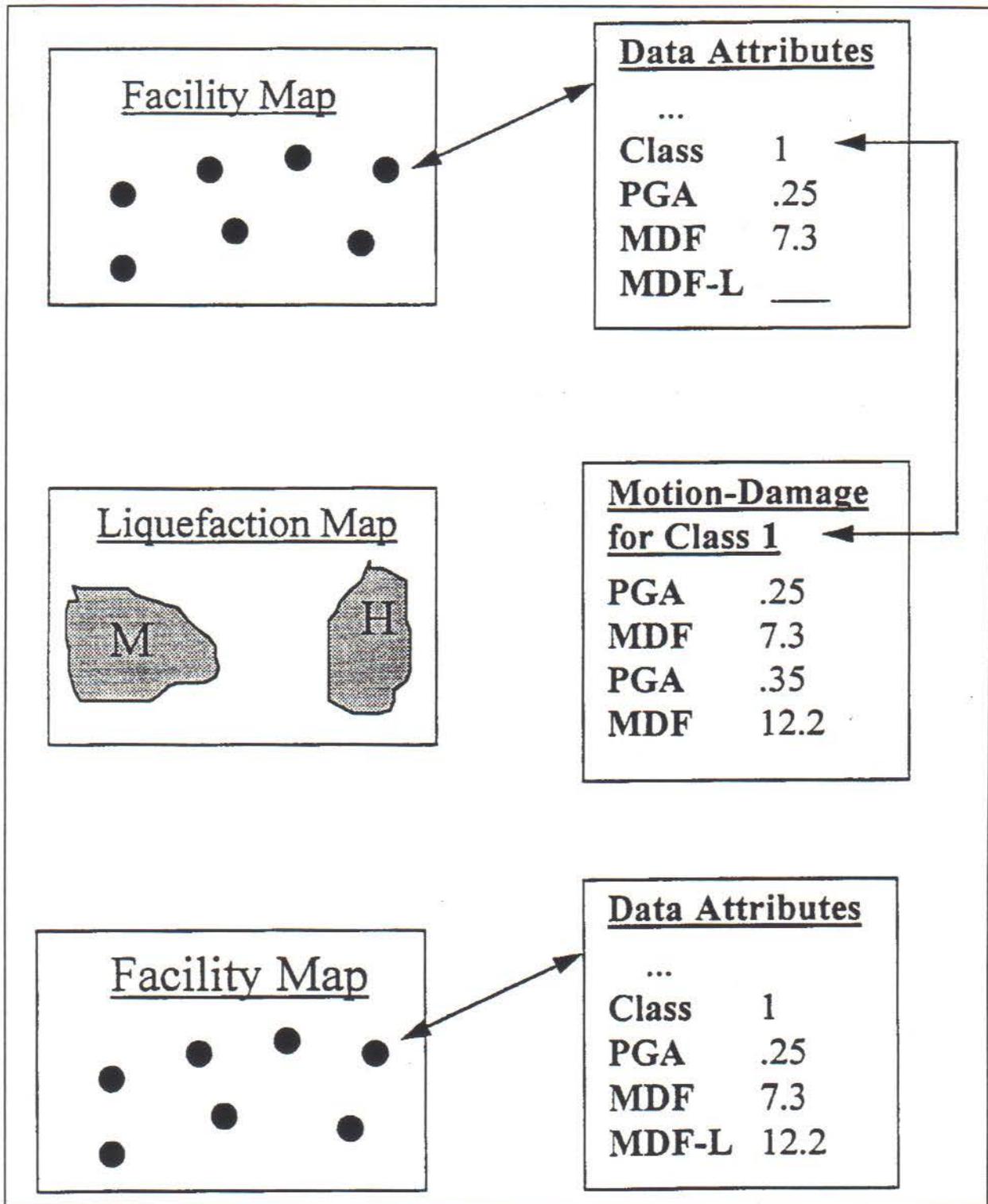


Figura 6.3 Ejemplo de cálculo de daño por licuefacción usando SIG.

## Building Valuation Data

At the request of numerous building officials, *Building Standards* offers the following building valuation data representing average costs for most buildings. Because residential buildings are the most common for many cities, two general classes are considered for these, one for "average" construction and the other for "good." Adjustments should be made for special architectural or structural features and the location of the project. Higher or lower unit costs may often result.

The unit costs are intended to comply with the definition of "valuation" in Section 423 of the 1991 *Uniform Building Code*™ and thus include architectural, structural, electrical, plumbing and mechanical work, except as specifically listed below. The unit costs also include the contractor's profit, which should not be omitted.

The determination of plan check fees for projects reviewed by the International Conference of Building Officials will be based on valuation, computed from these figures, which were established in April 1994.

Occupancy and Type	Cost per Square Foot, Average	Occupancy and Type	Cost per Square Foot, Average	Occupancy and Type	Cost per Square Foot, Average
<b>1. APARTMENT HOUSES:</b>		<b>7. DWELLINGS:</b>		<b>13. JAILS:</b>	
Type I or II F.R.*	\$ 72.50	Type V—Masonry	60.80	Type I or II F.R.	130.00
(Good) \$89.00		(Good) \$78.00		Type III—1-Hour	116.90
Type V—Masonry	58.80	Type V—Wood Frame	54.30	Type V—1-Hour	88.00
(or Type III)		(Good) \$77.90		<b>14. LIBRARIES:</b>	
(Good) \$71.80		Basements—		Type I or II F.R.	95.40
Type V—Wood Frame	51.60	Semi-Finished	16.20	Type II—1-Hour	68.90
(Good) \$65.90		(Good) \$18.50		Type II—N	65.50
Type I—Basement Garage	30.80	Unfinished	12.20	Type III—1-Hour	72.70
<b>2. AUDITORIUMS:</b>		(Good) \$14.30		Type III—N	69.20
Type I or II F.R.	85.80	<b>8. FIRE STATIONS:</b>		Type V—1-Hour	68.20
Type II—1-Hour	61.50	Type I or II F.R.	92.80	Type V—N	65.20
Type II—N	58.80	Type II—1-Hour	60.50	<b>15. MEDICAL OFFICES:</b>	
Type III—1-Hour	64.60	Type II—N	57.50	Type I or II F.R.*	97.40
Type III—N	61.70	Type III—1-Hour	66.70	Type II—1-Hour	74.60
Type V—1-Hour	61.40	Type III—N	63.80	Type II—N	71.20
Type V—N	58.50	Type V—1-Hour	62.20	Type III—1-Hour	78.60
<b>3. BANKS:</b>		Type V—N	59.20	Type III—N	75.70
Type I or II F.R.*	121.40	<b>9. HOMES FOR THE ELDERLY:</b>		Type V—1-Hour	72.90
Type II—1-Hour	88.20	Type I or II F.R.*	85.00	Type V—N	70.00
Type II—N	85.60	Type II—1-Hour	68.40	<b>16. OFFICES:</b>	
Type III—1-Hour	97.70	Type II—N	65.20	Type I or II F.R.*	87.20
Type III—N	94.30	Type III—1-Hour	71.20	Type II—1-Hour	57.80
Type V—1-Hour	87.90	Type III—N	68.20	Type II—N	55.20
Type V—N	85.00	Type V—1-Hour	68.60	Type III—1-Hour	62.40
<b>4. BOWLING ALLEYS:</b>		Type V—N	65.70	Type III—N	59.60
Type II—1-Hour	41.10	<b>10. HOSPITALS:</b>		Type V—1-Hour	57.80
Type II—N	38.30	Type I or II F.R.*	133.50	Type V—N	54.90
Type III—1-Hour	44.90	Type II—1-Hour	109.40	<b>17. PRIVATE GARAGES:</b>	
Type III—N	41.90	Type V—1-Hour	103.50	Wood Frame	19.60
Type V—1-Hour	30.50	<b>11. HOTELS AND MOTELS:</b>		Masonry	22.00
<b>5. CHURCHES:</b>		Type I or II F.R.*	82.20	Open Carports	13.30
Type I or II F.R.	81.20	Type III—1-Hour	71.00	<b>18. PUBLIC BUILDINGS:</b>	
Type II—1-Hour	60.20	Type III—N	67.60	Type I or II F.R.*	101.40
Type II—N	57.20	Type V—1-Hour	62.90	Type II—1-Hour	80.90
Type III—1-Hour	65.50	Type V—N	59.90	Type II—N	77.60
Type III—N	62.50	<b>12. INDUSTRIAL PLANTS:</b>		Type III—1-Hour	83.80
Type V—1-Hour	60.80	Type I or II F.R.	46.60	Type II—N	81.10
Type V—N	58.00	Type II—1-Hour	32.10	Type V—1-Hour	76.70
<b>6. CONVALESCENT HOSPITALS:</b>		Type II—N	29.40	Type V—N	73.80
Type I or II F.R.*	113.80	Type III—1-Hour	35.30	<b>19. PUBLIC GARAGES:</b>	
Type II—1-Hour	77.20	Type III—N	32.80	Type I or II F.R.*	39.60
Type II—N	80.10	Tilt-up	24.10	Type I or II Open Parking*	30.00
Type V—1-Hour	75.10	Type V—1-Hour	33.00	Type II—N	23.20
		Type V—N	30.20	Type III—1-Hour	29.90

\*Add 0.5 percent to total cost for each story over three. \*\*Deduct 20 percent for shell-only buildings. \*\*\*Deduct 11 percent for mini-warehouses.

### REGIONAL MODIFIERS

The following modifiers are recommended for use in conjunction with the building valuation data. In addition, certain local conditions may require further modifications. To use these modifiers, merely multiply the listed cost per square foot by the appropriate regional modifier. For example, to adjust the cost of a Type III One-hour hotel building of average construction for the Iowa area, select Regional Modifier 0.80 and unit cost from valuation data, \$71.00:

$$0.80 \times 71.00 = \$56.80 \text{ (adjusted cost per square foot)}$$

Eastern U.S.	Modifier	Eastern U.S. (cont.)	Modifier	Central U.S. (cont.)	Modifier	Western U.S.	Modifier
Connecticut	0.95	Pennsylvania		Kentucky	0.77	Alaska	1.30
Delaware	0.84	Philadelphia	0.96	Louisiana	0.78	Arizona	0.82
District of Columbia	0.87	Other	0.83	Michigan	0.84	California	
Florida	0.74	Rhode Island	0.94	Minnesota	0.86	Los Angeles	1.00
Georgia	0.68	South Carolina	0.70	Mississippi	0.71	San Francisco	1.13
Maine	0.81	Vermont	0.80	Missouri	0.78	Other	0.94
Maryland	0.79	Virginia	0.73	Nebraska	0.75	Colorado	0.81
Massachusetts	0.94	West Virginia	0.82	North Dakota	0.80	Hawaii	1.14
New Hampshire	0.82	<b>Central U.S.</b>		Ohio	0.80	Idaho	0.80
New Jersey	0.91	Alabama	0.72	Oklahoma	0.71	Montana	0.79
New York		Arkansas	0.70	South Dakota	0.78	Nevada	0.89
New York City	1.16	Illinois	0.87	Tennessee	0.72	New Mexico	0.76
Other	0.87	Indiana	0.82	Texas	0.74	Oregon	0.83
North Carolina	0.70	Iowa	0.80	Wisconsin	0.85	Utah	0.75
		Kansas	0.74			Washington	0.88
						Wyoming	0.80

Figura 6.4 Muestra de costos de construcción.

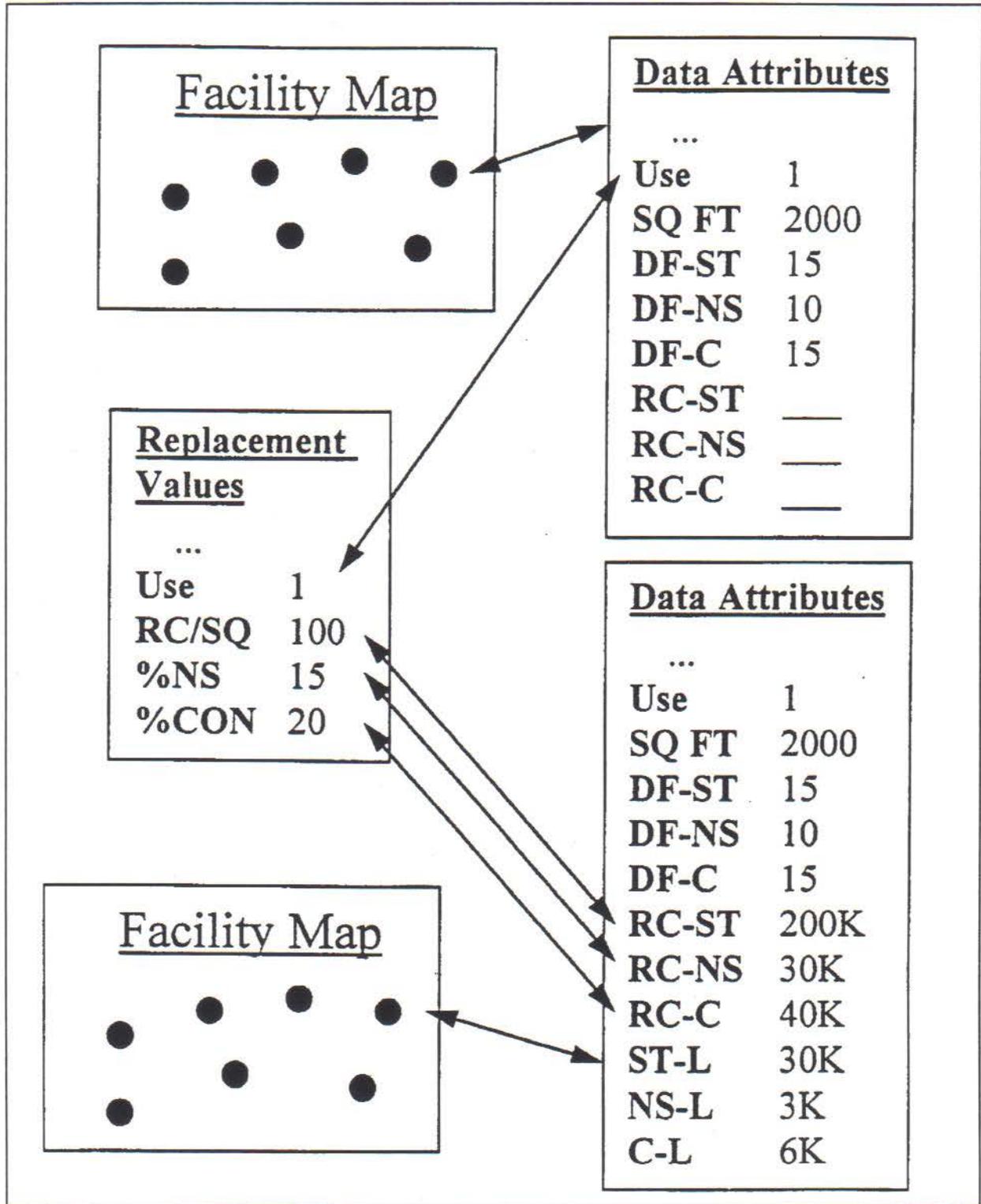


Figura 6.5 Ejemplo de estimación de pérdida directa para edificios.

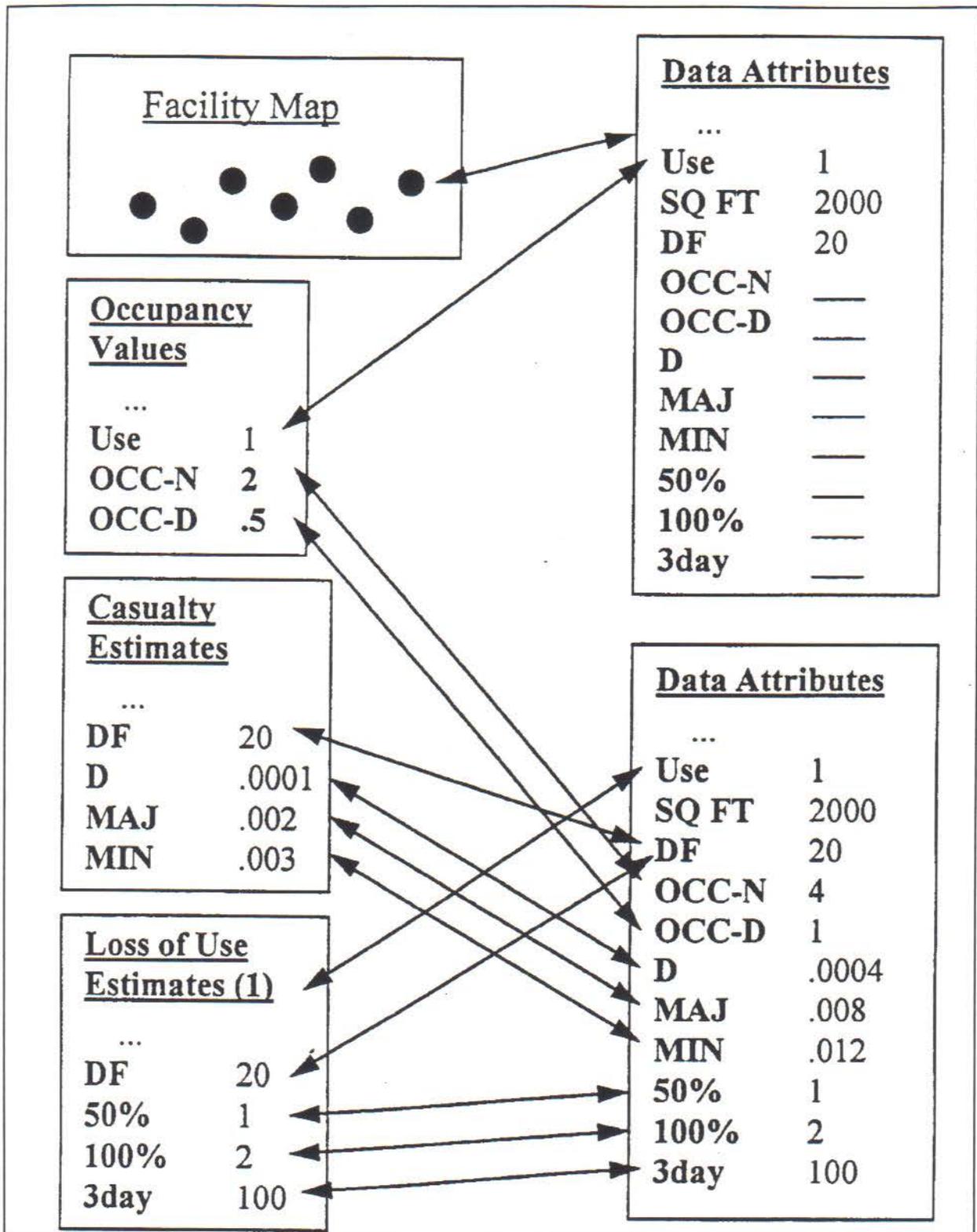
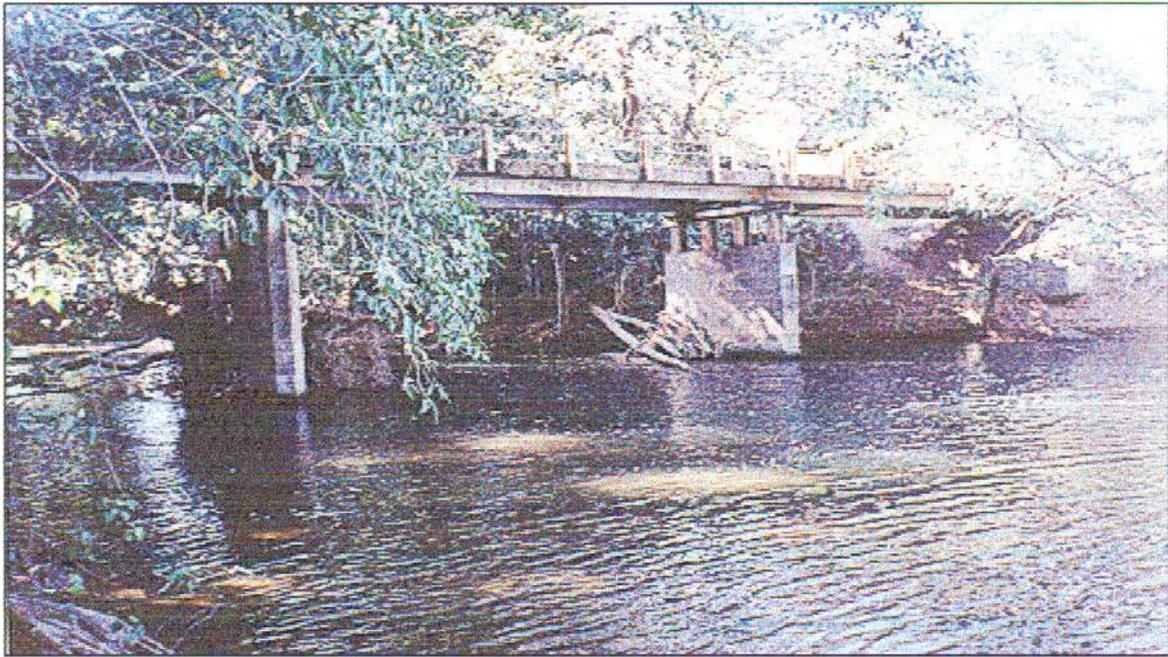
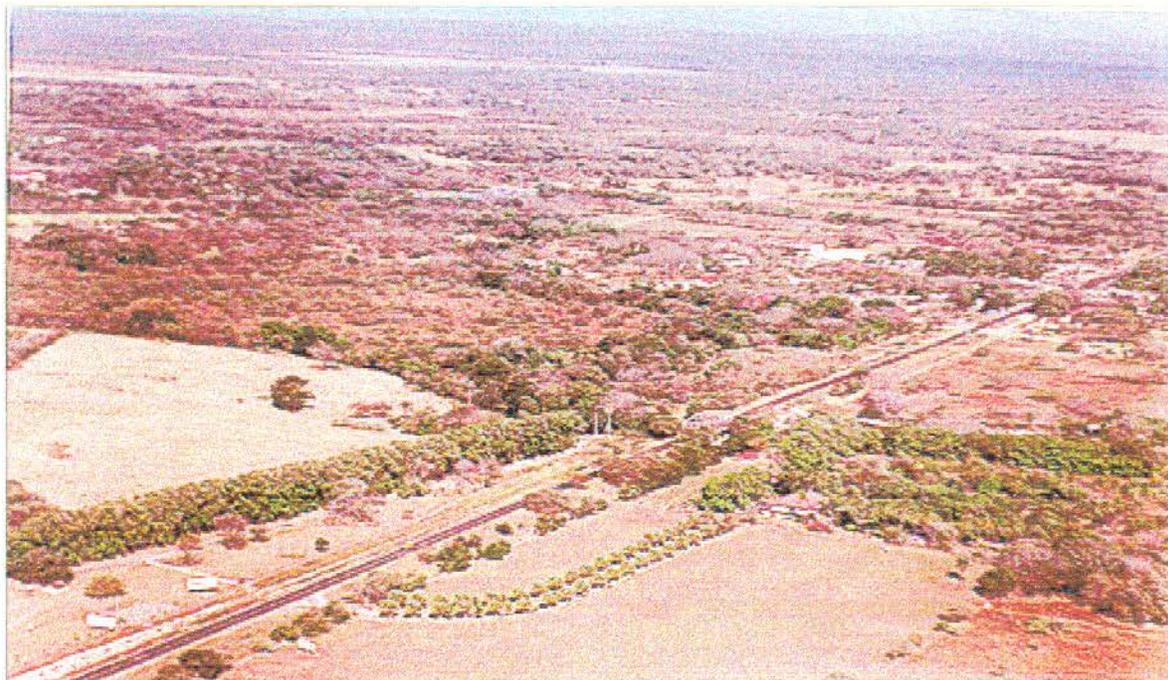


Figura 6.6 Ejemplo de estimación de pérdida indirecta para edificios.

# Ilustraciones



**Ilustración 1.** Puente mixto concreto-acero sobre la quebrada Pánica, provincia de Puntarenas



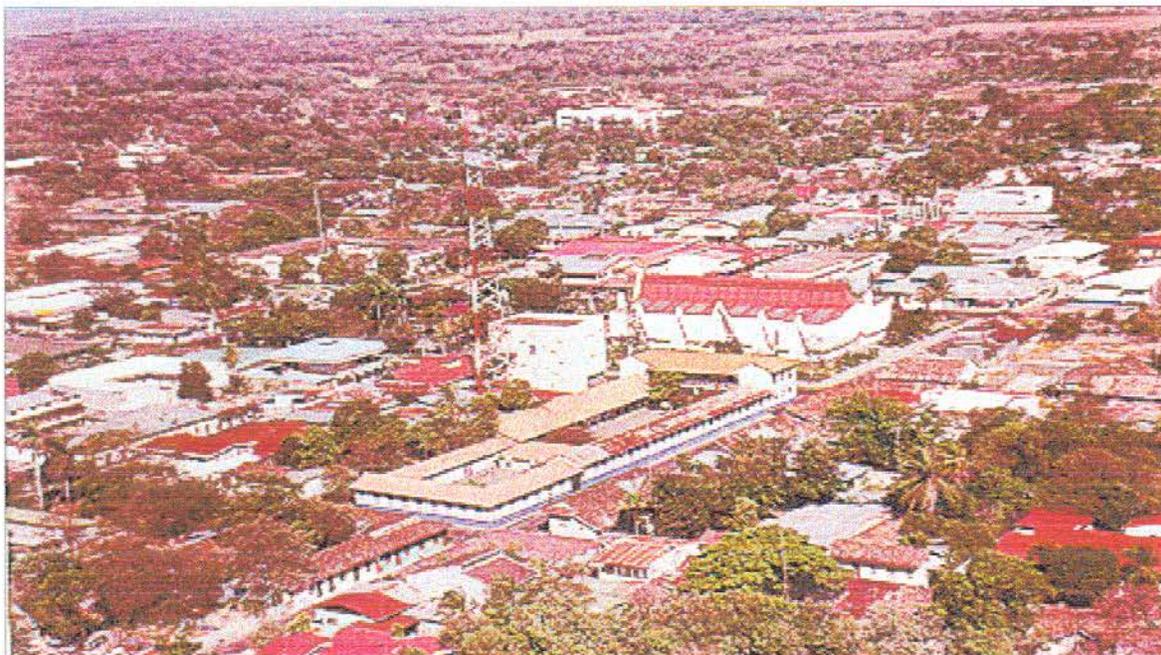
**Ilustración 2.** Vista aérea de la Ruta Nacional 1, Liberia. Obsérvese la superestructura de acero del puente sobre el río Liberia.



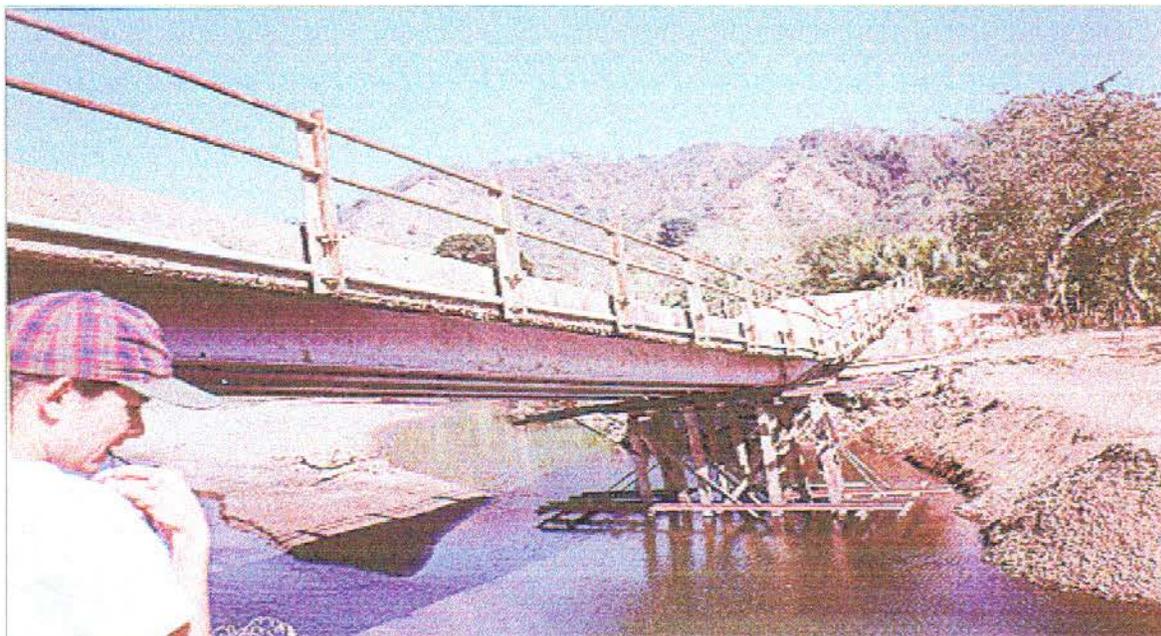
**Ilustración 3.** Vista aérea de los accesos del futuro puente sobre el río Tempisque.



**Ilustración 4.** Hoteles y marina del desarrollo turístico de Flamingo, provincia de Guanacaste.



**Ilustración 5.** Vista aérea de la ciudad de Liberia.



**Ilustración 6.** Puente sobre la quebrada La Tigra (provincia de Puntarenas) colapso por inundaciones.

# Anexo

**Fórmula de investigación de campo - Estructuras de Puentes  
(adaptable a otras estructuras ).**

Nombre del Investigador: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

**Información del Puente**

N° de gira: \_\_\_\_\_ N° de puente en esta gira: \_\_\_\_\_

Ruta/Entrada: \_\_\_\_\_

Nombre del río sobre el que pasa: \_\_\_\_\_ N° de placa: \_\_\_\_\_

Longitud: \_\_\_\_\_ Ancho: \_\_\_\_\_ Fecha de Construcción: \_\_\_\_\_

Altura del puente hasta la superficie de agua: \_\_\_\_\_

Sesgo / Curva: \_\_\_\_\_

(Cuando el puente se encuentra en una dirección no ortogonal al río *-sesgo-* indicar el ángulo aprox, o indicar *Curva* si se encuentra en una curva de la carretera).

¿Acelerógrafos instalados? \_\_\_\_\_

¿Pasopuente?: \_\_\_\_\_

(Pasopuente es cuando un puente no pasa sobre un río, sino que sobre una carretera)

Tipo de Superestructura: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Tipo de Subestructura: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Long. losa entrada \_\_\_\_\_ en la salida \_\_\_\_\_

Ancho pavimento en la entrada: \_\_\_\_\_ en la salida \_\_\_\_\_

Longitud baranda de seguridad entrada: izquierda \_\_\_\_\_ derecha \_\_\_\_\_

Longitud baranda de seguridad salida: izquierda \_\_\_\_\_ derecha \_\_\_\_\_

**Materiales utilizados:**

- 1.Hormigon 2.Acero 3.Piedra 4.Madera  
5.Asfalto 6.Acero corrugado 7.Lastre 8.Tierra

Piso \_\_\_\_\_

Superficie de rodamiento \_\_\_\_\_

Cordón \_\_\_\_\_

Barandas de los accesos \_\_\_\_\_

Pavimento de los accesos \_\_\_\_\_

Largueros o vigas longitudinales \_\_\_\_\_

Travesaños o vigas transversales \_\_\_\_\_

Bastiones de entrada \_\_\_\_\_ salida \_\_\_\_\_

Pilas \_\_\_\_\_

Nº vigas transversales \_\_\_\_\_ Nº de cerchas \_\_\_\_\_

Area \_\_\_\_\_ longitud \_\_\_\_\_

Nº vigas longitudinales \_\_\_\_\_ altura \_\_\_\_\_ Nº de cerchas \_\_\_\_\_ altura \_\_\_\_\_

Area \_\_\_\_\_ longitud \_\_\_\_\_

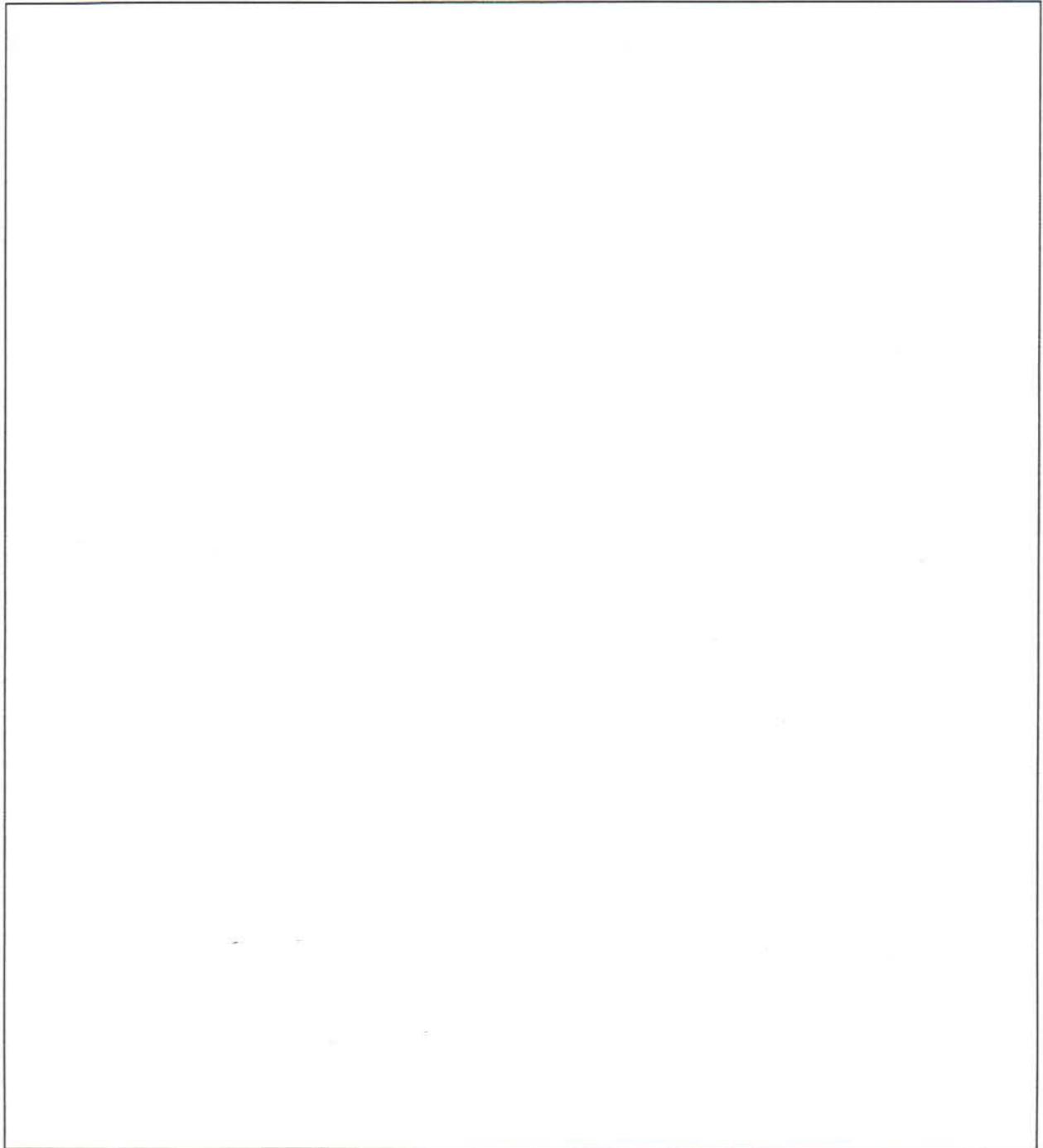
**Datos Misceláneos**

Fotos:

Serie (nombre) : \_\_\_\_\_ Números de fotos: \_\_\_\_\_

**Notas o croquis**

- detallar bastiones, pilas, accesos, detalle del apoyo de la estructura en los bastiones, anchos de las pilas, y especificar a donde se dirige cada extremo del puente.



**Información del sitio**

Tipo de suelos: \_\_\_\_\_

¿Formación de conos de arena?: \_\_\_\_\_ Corrimiento lateral : \_\_\_\_\_

¿Fallas de suelo ? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

¿Movimiento de fundación? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Daños en la estructura por terremoto**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Pérdidas estimadas en total:

Menos de 10% \_\_\_\_\_ 10-50% \_\_\_\_\_ más de 50% \_\_\_\_\_

¿El puente funciona? Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ Si contesta no, ¿Por qué? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Si no funciona, ¿Qué efecto tiene en la ruta ? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

<i>Subestructura</i>	<i>Calificación</i>	<i>Subestructura</i>	<i>Calificación</i>
Apoyos		<i>Bastiones</i>	
Largueros		Distancia entre bastiones	
Vigas transversales		Socavación	
Soldadura (apoyos)		Aletones	
Cerchas (en general)		Muros traseros	
Corrosión en los apoyos		Erosión	
Remaches o tornillos		Asentamiento	
Soldadura		Deslizamiento	
Daños		<i>Pilas</i>	
Deformación		Inclinación	
Alineamiento entre miembros		Pandeo	
Vibración bajo carga		Socavación	
Pasadores		Asentamiento	
		Reventadura	
		Cabezales	
		Corrosión del acero	
		<i>Dimensiones generales</i>	
		Espesor de la superficie de ruedo	
		Espesor del cordón	

***Recomendaciones para investigaciones futuras en Estructuras de Transporte***

Nombre del Investigador: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Fórmula de Investigación de Campo**

Información General del Edificio:

Fecha \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

Tipo  Escuela Nombre: \_\_\_\_\_. Hospital

Dirección \_\_\_\_\_.

Ruta/Entrada \_\_\_\_\_.

Número de Pisos \_\_\_\_\_ Fecha de Contrucción \_\_\_\_\_.

Area de Construcción \_\_\_\_\_.

**Sistema de resistencia lateral:**

Material de los marcos

- Concreto armado
- Concreto Prefabricado. Sistema tipo \_\_\_\_\_.
- Marcos de Acero No Arriostrados
- Marcos de Acero Arriostrados
- Madera

Muros de Corte

- Concreto colado en sitio
- Concreto Prefabricado
- No hay

Estado

- Bueno
- Regular
- Malo \_\_\_\_\_.

**Paredes**

Material

- Mampostería Reforzada }  Confinada
- Mampostería No Reforzada }  Inconfinada
- Madera
- Baldosas (Prefabricado)

Estado

- Bueno
- Regular
- Malo \_\_\_\_\_

**Techos**

Material de Cerchas

- Madera
- Acero
- Otro \_\_\_\_\_

Cubierta

- Lámina de Zinc
- Lámina de acero galvanizado
- Ricalit, Fibrolit, Asbesto-cemento
- Otro \_\_\_\_\_

**Pisos**

Material

- Madera
- Cerámica
- Terrazo
- Otro \_\_\_\_\_

Entrepiso

- Losa de Concreto
- Concreto Prefabricado (vigüeta, bloques)
- Madera (vigas de madera, piso de tablilla)
- Metal
- Otro \_\_\_\_\_

**Fundaciones**

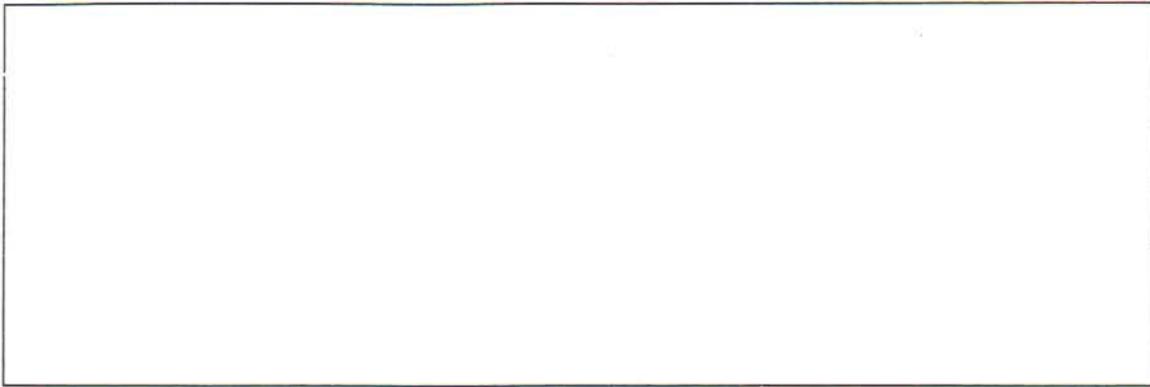
Tipo

- Placa Corrida
- Placas Aisladas
- Profundas (Pilotes)

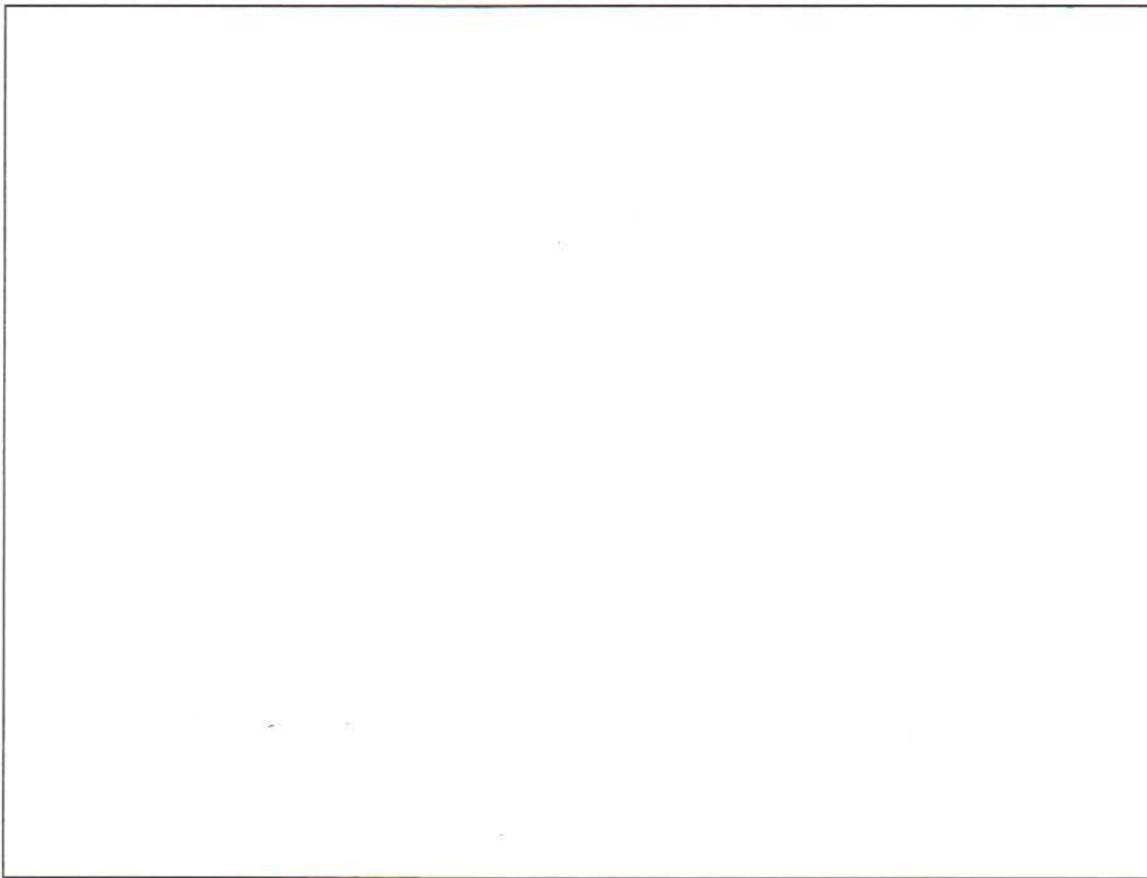
Estado

- Bueno
- Regular
- Malo

**Croquis Ubicación**



**Croquis en planta**



**Observaciones**

---

---

---

---

---

**Fórmula de Investigación de Campo – Escuelas y Hospitales**

Nombre del Investigador: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

**Información del Edificio**

No de gira: \_\_\_\_\_ No de edificio en esta gira: \_\_\_\_\_

Ruta/Entrada: \_\_\_\_\_

Tipo de Edificio (escuela u hospital): \_\_\_\_\_

Nombre de la escuela u hospital: \_\_\_\_\_

Dirección o ubicación: \_\_\_\_\_ ¿Fecha de construcción? \_\_\_\_\_

Número de pisos: \_\_\_\_\_ Sótano (s): \_\_\_\_\_

Área de Construcción: \_\_\_\_\_

Sistema de resistencia vertical: \_\_\_\_\_

Sistema de resistencia lateral: \_\_\_\_\_

Condición de las paredes: \_\_\_\_\_

Condición de las fundaciones: \_\_\_\_\_

Condición de las cercas y techos: \_\_\_\_\_

En caso de varios pisos, Describa el sistema de entrepisos: \_\_\_\_\_

Configuración del edificio: \_\_\_\_\_

Evidencia de respuesta torsional: \_\_\_\_\_

Calidad de construcción: \_\_\_\_\_

¿Acelerógrafos instalados? \_\_\_\_\_

**Información del sitio**

Tipo de suelos: \_\_\_\_\_

Sitio: Pendiente \_\_\_\_\_ % Nivel: \_\_\_\_\_

¿Formación de conos de arena? \_\_\_\_\_

¿Fallas de suelo presentes? \_\_\_\_\_

**Materiales utilizados**

1. Concreto 2. Acero 3. Piedra 4. Madera 5. Zinc 6. Tierra 7. Blocks

Cerchas : \_\_\_\_\_

Techos : \_\_\_\_\_

Columnas: \_\_\_\_\_

Vigas : \_\_\_\_\_

Paredes : \_\_\_\_\_

Losa : \_\_\_\_\_

No de columnas: \_\_\_\_\_

Altura libre mayor: \_\_\_\_\_

No de vigas: \_\_\_\_\_

Luz mayor: \_\_\_\_\_

**Datos Misceláneos**

Arquitecto: \_\_\_\_\_ Ingeniero: \_\_\_\_\_

¿Están los planos disponibles?: Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

¿Adonde? \_\_\_\_\_

Fotos: Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

**Rollo 1.** Serie(nombre): \_\_\_\_\_ Número de fotos: \_\_\_\_\_**Rollo 2.** Serie(nombre): \_\_\_\_\_ Número de fotos: \_\_\_\_\_**Rollo 3.** Serie(nombre): \_\_\_\_\_ Número de fotos: \_\_\_\_\_**Rollo 4.** Serie(nombre): \_\_\_\_\_ Número de fotos: \_\_\_\_\_

Otro: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Notas o croquis

**Daños a la estructura por terremoto:**

Comentarios:

---



---



---



---

Pérdidas estimadas en total:

Menos de 10% \_\_\_\_\_ 10-50% \_\_\_\_\_ más de 50% \_\_\_\_\_

¿Es el edificio funcional? Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ Si no, ¿Por qué no? \_\_\_\_\_

---



---

Estado de los Servicios Básicos: \_\_\_\_\_

Muertes: \_\_\_\_\_ Daños: \_\_\_\_\_ Desconocido: \_\_\_\_\_

---

**Cuantificación de daños por cuadras**

**Nombre de Calle**

**Nombre de Calle**

**Tipos de Estructuras**

MSR - Mampostería no reforzada  
 MM - Marcos de madera  
 C - Concreto  
 RM - Marcos rígidos  
 A - Acero  
 BA - Base Aislada

**Tipo de daño**

N - Ninguno  
 S - Leve  
 M - Moderado  
 V - Severo  
 T - Total  
 C - Colapso

Estimación de la intensidad en la escala Mercalli Modificada \_\_\_\_\_

¿Necesitan las edificaciones una investigación posterior? Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

Si sí, ¿porqué? \_\_\_\_\_

**Daños no estructurales**

Tomar nota del desempeño de elevadores, cielos falsos, lámparas, red de extintores, ventanas, particiones, gabinetes, equipo, aisladores de vibración, archivadores, estantería, tuberías, \_\_\_\_\_ recubrimientos, etc.: \_\_\_\_\_

**Recomendaciones para investigaciones futuras en Edificios**

Nombre del Investigador: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

---



---



---



---