

## 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

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

- $Sv(\omega, \xi)$  = 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

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

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  $X$

$P\{J\}$  = 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:

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

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

$m_{II}$  = 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 sobrepone 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

- Antenucci, 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, Ressenlaer 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.