

***CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y
GEOMÁTICA***

**«ING. JORGE L. TAMAYO», A.C.
CentroGeo**

Centro Público de Investigación CONACYT

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS
URBANOS A PARTIR DE DATOS GEOESPACIALES**

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestro en Geomática

Presenta:

JESÚS HÉCTOR GARCÍA MAGAÑA

**SUPERVISOR PRINCIPAL:
DR. JOSÉ LUIS SILVÁN CÁRDENAS**

**EXAMINADOR EXTERNO:
DR. DARÍO RIVERA VARGAS**

**COMITÉ SUPERVISOR:
MTRO. DANIEL LÓPEZ LÓPEZ**

México, D.F., Junio de 2015

© CentroGeo. Derechos reservados. El autor otorga a CentroGeo el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes.

RESUMEN

Se presenta la evaluación del grado de vulnerabilidad sísmica en función del índice de daño físico que pueden tener diferentes construcciones de la zona norte de la delegación Benito Juárez de la Ciudad de México ante sismos de intensidad extraordinaria a partir de datos geospaciales, que incluyen: imágenes satelitales de alta resolución QuickBird, un modelo digital de elevaciones LIDAR e información catastral en formato vectorial de la zona estudiada. De la depuración y concatenación de los datos disponibles se han deducido e inferido parámetros relevantes para los tipos de construcción evaluadas que permitan estimar su grado de vulnerabilidad sísmica en un escenario determinado por la normativa aplicable vigente en la Ciudad de México, la cual proporciona una zonificación sísmica y sus respectivos espectros de diseño. Los parámetros relevantes obtenidos fueron: alturas, áreas construidas y año de construcción de las estructuras de los cuales se determinaron periodos fundamentales de vibración de los diferentes tipos de construcciones evaluadas lo que permitió estimar la demanda sísmica sobre la construcción a partir de los espectros de diseño vigentes en la zona sísmica en la que se ubica cada construcción evaluada. Los tipos de construcción evaluadas fueron: edificios y viviendas. Se calculó la vulnerabilidad de los edificios con base en funciones de vulnerabilidad que correlacionan el grado de daño físico con la intensidad sísmica. Se concluye en lo general, que las construcciones de la zona de estudio presentan vulnerabilidad baja, no obstante algunos edificios de más de cinco niveles pueden ofrecer vulnerabilidades moderadas o altas.

RECONOCIMIENTOS

Agradezco a los profesores, Dr. José Luis Silván Cárdenas, Mtro. Daniel López López, Dr. Darío Rivera Vargas el apoyo, orientación, generosidad y paciencia que me brindaron en la elaboración, revisión y corrección de este trabajo; así como el invaluable conocimiento que me transmitieron.

Agradezco a la Dra. Carmen Reyes Guerrero, a los directivos, profesores y compañeros del CentroGeo la oportunidad que me brindaron de conocer, aprender y participar en esta apasionante disciplina científica llamada Geomática.

Agradezco al CONACYT la beca que permitió realizar esta maestría.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Resumen	ii
Reconocimientos	iii
Tabla de contenido	iv
Lista de tablas	vi
Lista de figuras	vii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	
1.2 Objetivos	
1.3 Contenido del trabajo	
Capítulo 2. Vulnerabilidad. Conceptos y metodologías	8
2.1 Interrelación entre vulnerabilidad, peligro y riesgo	
2.2 Metodologías para evaluar la vulnerabilidad	
Capítulo 3. Datos geoespaciales y parámetros para evaluar la vulnerabilidad sísmica de construcciones	16
3.1 Conceptos generales	
3.2 Percepción remota.	
3.3 Tecnologías LIDAR	
3.4 Parámetros para evaluar de vulnerabilidad sísmica de construcciones	
Capítulo 4. Metodología propuesta	34
4.1 Marco conceptual	
4.2 Metodología para el tratamiento de datos e información	
4.3 Funciones de vulnerabilidad utilizadas	

Capítulo 5. Caso de estudio. Delegación Benito Juárez, Ciudad de México	58
5.1 Aspectos humanos	
5.2 Evolución de los reglamentos de construcción aplicables en la zona de estudio	
5.3 Análisis de la vulnerabilidad sísmica de construcciones en la zona de estudio	
5.4 Análisis de resultados	
Capítulo 6. Conclusiones	94
Bibliografía	96

Lista de tablas

Tabla 2.1 Parámetros considerados para la estimación de vulnerabilidad sísmica en edificios, (Taubenböck, 2008)

Tabla 4.1 Parámetros de las funciones de daño físico global para edificios de varios pisos, (Díaz, 2004)

Tabla 4.2 Parámetros para construir funciones de vulnerabilidad de algunos casos de viviendas (Flores, 2006)

Tabla 5.1 Requerimientos relevantes para diseño sísmico de estructuras en la Ciudad de México. (Resumido de Alcocer (2008))

Tabla 5.2 Estadísticas de las estructuras construidas hasta el año 2000 en la zona de estudio aplicando la metodología propuesta

Tabla 5.3 Relación entre el índice de daño físico, nivel de daño y vulnerabilidad esperados en la estructura

Tabla 5.4 Estadísticas relevantes de las estructuras de la zona de estudio después de aplicar la metodología propuesta con datos LIDAR de 2008 (*Promedio ponderado)

Tabla 5.5 Incremento promedio de la tarifa propuesta respecto a la anterior (Izquierdo y Avilés, 1993)

Lista de figuras

Figura 2.1 Curvas de vulnerabilidad para diversos tipos de edificios, (Taubenböck, 2008)

Figura 2.2 Curvas de vulnerabilidad para edificios de 3 y 4 niveles (Polli, 2012)

Figura 3.1 Componentes de un sistema de percepción remota, (Chuvieco, 2002)

Figura 3.2 El espectro electromagnético, (Chuvieco, 2002)

Figura 3.3 Diagrama esquemático de operación de un LIDAR aerotransportado haciendo escaneo en línea, resultando en líneas paralelas de puntos medidos, (NOAA, 2012)

Figura 3.4 Esquema básico de recolección de datos LIDAR desde un avión, (NOAA, 2012)

Figura 3.5 Múltiples retornos de un solo pulso, (NOAA, 2012)

Figura 3.6 Puntos coloreados por elevación, (NOAA, 2012)

Figura 3.7 Raster DEM creado con una rutina IDW, (NOAA, 2012)

Figura 3.8 Contornos generados con datos LIDAR. Derivado directamente de la fuente LIDAR, izquierda. Editado para generar un productos más intuitivo pero con menor precisión, derecha. (NOAA, 2012)

Figura 4.1 Complejidad en la gestación de riesgos por fenómenos naturales, (Pigeon, 2012)

Figura 4.2 Sismo tectónica de la República Mexicana (Hartmut, 1991)

Figura 4.3 Sismogramas del temblor del 19 de septiembre de 1985 detectados con sismógrafos localizados en diversos puntos de la ciudad de México, (Santoyo, 2005)

Figura 4.4 Zonificación sísmica del Distrito Federal, (NTC-sismo, 2004)

Figura 4.5 Espectros de diseño sísmico para el Distrito Federal

Figura 4.6 Comparación de aceleraciones del sismo de 1985 contra aceleraciones de la red de observación sísmica del CENAPRED, registradas en el sismo del 21 de enero de 2003 (Morquecho, 2003)

Figura 4.7 Diagrama de flujo del tratamiento de datos en formato vector

Figura 4.8 Diagrama de flujo del tratamiento de los datos en formato raster

Figura 5.1 Distrito Federal en 1903 (De Gortari, 1998)

Figura 5.2 Distrito Federal en 1924 (De Gortari, 1998)

Figura 5.3 Distrito Federal en 1928 (De Gortari, 1998)

Figura 5.4 Distrito Federal en 1929 (De Gortari, 1998)

Figura 5.5 Distrito Federal en 1941 (De Gortari, 1998)

Figura 5.6 Distrito Federal de 1960 a 1969 (De Gortari, 1998)

Figura 5.7 Distrito Federal de 1970 a 1979 (De Gortari, 1998)

Figura 5.8 Zonas sísmicas en la delegación Benito Juárez. Zona I (verde), Zona II (amarillo), Zona IIIa (naranja), Zona IIIb (rojo), Zona IIIc (marrón)

Figura 5.9 Mapa de la zona de estudio

Figura 5.10 Zonas sísmicas de la República Mexicana, (Izquierdo y Avilés, 1993)

Figura 5.11 Microzonificación Sísmica del Valle de México. (Izquierdo y Avilés, 1993)

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las ciudades son sistemas complejos, por lo que la ocurrencia de perturbaciones repercute en gran parte de sus subsistemas aunque el evento impacte en sólo uno de ellos. Los peligros que pueden afectar a una urbe pueden ser naturales y/o antropogénicos; entre los primeros pueden mencionarse los peligros geológicos (fallas y fracturas geológicas, sismos, actividad volcánica, inestabilidad de laderas) y los hidrometeorológicos (inundaciones); mientras que entre los de origen antropogénico se pueden incluir los peligros relacionados a actividades en instalaciones industriales (químicos y petroquímicos, nucleares), sanitarios (rellenos sanitarios, descargas de aguas residuales) y los peligros socio-organizacionales (concentración masiva, conflictos sociales), (SGM, 2012).

Dado el dinamismo de un sistema urbano su morfología, extensión y complejidad cambian constantemente lo que aumenta el número de afectaciones potenciales por los peligros existentes ó por nuevos peligros, sean naturales o antropogénicos, que se generen por esta dinámica.

Los peligros pueden dar lugar a desastres, que no deben llamarse “desastres naturales” aun cuando sean provocados por un peligro natural; los desastres y/o el riesgo de que se presenten, son resultado de la dinámica del sistema urbano en su conjunto, un inmensidad de lazos de retroalimentación, umbrales, ideas, mecanismos y formas; no existe una línea simple de causalidad en la producción de condiciones humanas y ambientales (Taubenböck et al, 2008).

La complejidad del sistema urbano en su conjunto requiere metodologías que permitan una rápida y confiable evaluación de las diversas variables, potencialmente, generadoras de un desastre. La eficacia de estas metodologías, en mucho depende de las herramientas y recursos con que se cuente para llevar a cabo las diferentes tareas que permitan visualizar y analizar las interrelaciones entre los subsistemas que conforman el sistema urbano.

Los sistemas urbanos, como se ha mencionado, están compuestos de diversos subsistemas los cuales se organizan en diversos niveles de jerarquía y peso; estos niveles no permanecen estáticos, son cambiantes; son temporales y relativos por lo que, aparentemente, pueden desaparecer del contexto o bien emerger para una situación dada. No obstante, la compleja interacción de estos subsistemas tienen el espacio como punto común por lo que, puede plantearse al sistema urbano como un espacio multidimensional en el que cada subsistema es una dimensión. Entre estas dimensiones, la dimensión física –entendida como las

estructuras e infraestructuras existentes- tienen un peso importante ya que en ellas se aprecia con mucha claridad no sólo la intensidad de daño causado, sino también la capacidad de respuesta del sistema urbano en su conjunto.

A continuación se anotan algunos trabajos realizados sobre la utilización de información geoespacial en la evaluación de vulnerabilidades sísmicas:

- **Caliskan (2005)** plantea utilizar datos de percepción remota de alta resolución espacial, concretamente una imagen IKONOS de un metro de resolución tomada el 20 de diciembre de 2003, para la adquisición y actualización de datos para el manejo de desastres definiendo indicadores de vulnerabilidad con base a elementos espaciales y no-espaciales en las zonas de Zeytinburnu y Uskudar en Estambul, Turquía. Los indicadores espaciales, llamados físicos, se derivan de datos directos captados por percepción remota; mientras que los no-espaciales, llamados sociales o económicos, se derivan de manera indirecta de los datos captados por percepción remota. La metodología que plantea se inicia con la definición y clasificación de los indicadores de vulnerabilidad en tres clases: físicos, económicos y sociales. Los indicadores físicos se extraen directamente por percepción remota, dichos indicadores son tales como traza de las calles, densidad de edificios, alineamientos de edificios, densidad de espacios abiertos y cobertura de suelo. Los indicadores sociales y económicos, así como algunos físicos que no pudieron obtenerse por percepción remota, tales como: la altura, material de construcción, uso, edad de edificios, se derivan mediante la aplicación de cuestionarios socio-económicos en trabajos de campo; durante este trabajo de campo también se obtuvo información adicional de entidades municipales y compañías privadas.

Después de implementar el análisis de los indicadores obtenidos en un ambiente GIS como elementos vectoriales (capas de puntos, y polígonos) se realizó la sobre posición de capas y se analizó la interacción entre ellas. Finalmente se generó un mapa de vulnerabilidad a partir de generar uno de unidades homogéneas mediante un análisis de correspondencia, esto es usando métodos estadísticos que permiten analizar y describir gráfica y sintéticamente datos de gran contingencia. Los indicadores de vulnerabilidad física derivados de la percepción remota fueron ponderados, lo que se refiere a cuantificar y convertir los datos a un formato cuantitativo comparable. Este mapa de unidades homogéneas se combinó con un método de muestreo de cuadrantes aéreo, en el cual las áreas son divididas en cuadrantes de igual tamaño, esta combinación ayudó a inferir las características de un área construida completa a partir de solo un edificio muestreado ahorrando tiempo durante el levantamiento de campo. Este mapa de vulnerabilidad zonal muestra tres zonas

de vulnerabilidad en términos de alta, media y baja probabilidad.

- **Taubenböck (2008)** inicia planteando un marco de vulnerabilidad, este es un concepto holístico en el que componentes físicos, ambientales, socioeconómicos y políticos se deben tomar en cuenta; no obstante este trabajo se enfoca sobre las capacidades de la percepción remota para contribuir a la actualización de información de la dimensión espacial de vulnerabilidad para el complejo sistema urbano de la ciudad de Estambul, Turquía. Establece una clasificación de coberturas de suelo en el área urbana basada en una imagen satelital de alta resolución para analizar la distribución espacial de diferentes tipos de edificios, capacidad de tránsito de la red de calles y la identificación de espacios abiertos. Adicionalmente, plantea que un modelo digital de elevación (DEM) permite analizar la situación del terreno. Presenta una metodología que combina estos atributos relacionados con la dimensión física de la vulnerabilidad. En este proceso se representa un sistema coordinado de N dimensiones en el que se representan, una en cada eje, la vulnerabilidad de cada componente de la dimensión física. Esto permite la identificación del grado de vulnerabilidad así como los factores determinantes de la vulnerabilidad en una localización específica.

El área estudiada es la zona llamada Zeytinburnu, localizada en el lado europeo de Estambul. Utiliza una imagen IKONOS de alta resolución espacial, 1-m pancromática, 4-m multiespectral tomada el 19 de abril de 2004. Adicionalmente se utiliza un DEM interferométrico basado en datos de la banda X y C de la Shuttle Radar Topography Mission tomada en febrero del 2000, el DEM tiene un tamaño de pixel de 25 m y una precisión de altura de 6 m, aproximadamente y es utilizado para localizar áreas de potenciales deslizamientos de tierras.

En este estudio se utiliza la información espectral y estructural para distinguir diferentes características de los edificios; las longitudes de las sombras de los edificios se utilizan para estimar su altura, clasificándolos en tres clases: de 1 a 3 niveles, de 4 a 7 y más de 7. La edad de los edificios se evalúa por los cambios detectados usando datos de la serie Landsat de los años 1975, 1987 y 2000. El distrito de Zeytinburnu muestra predominantemente estructuras construidas antes de 1975, lo que da una idea de los materiales y tipo de construcción.

- **Ricci (2011)** plantea realizar una evaluación de vulnerabilidad sísmica a gran escala en la ciudad de Avellino en la región de Campania, Italia, mediante levantamientos de campo de las características geométricas, tipología estructural y edad de edificios, y una misión aerotransportada de percepción remota que proporcione un estimado detallado de parámetros

geométricos 3D de los edificios a través de una metodología sencilla que integra tecnología LIDAR, aerofotogrametría y técnicas GIS. Aplica un procedimiento analítico para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios de concreto reforzado a un conjunto de edificios considerando (i) datos del levantamiento de campo y (ii) los datos LIDAR combinados con datos del censo como fuente de datos alternativa. Compara los resultados obtenidos entre los análisis usando los tipos de datos y destaca una dispersión aceptable cuando se usan datos obtenidos por técnicas de percepción remota.

Se utiliza el sistema LIDAR Optech ALTM 3100 con una densidad de cuatro puntos por metro cuadrado. También se usa un sensor hiperespectral AISA-Eagle de 31 bandas.

La metodología de trabajo planteada por Ricci (2011) se dividió en las siguientes etapas:

1. El levantamiento de campo para obtener un inventario de edificios, para ello se identificaron, durante el levantamiento, en cada uno de los edificios muestreados la posición (aislado o adjunto a otros edificios), número de niveles, área de desplante aproximada, edad de la construcción, uso, morfología, altura, regularidad, topología (tratando de identificar el sistema estructural), material predominante de construcción (mampostería, concreto, acero), áreas de vacíos (en muros), bahías, escaleras, entre otras características. Esta información se analizó para obtener indicadores estadísticos sobre las características predominantes en cuanto a tipologías estructurales, materiales de construcción y edad de las construcciones.

2. Análisis y procesamiento de la información obtenida durante la misión aerotransportada. Durante esta etapa y mediante el procesamiento de información LIDAR 3D fue posible obtener parámetros geométricos de edificios, así como una caracterización de las cubiertas de los edificios, perfiles de desplante y la localización de árboles en la zona estudiada.

3. Proceso GIS, en esta etapa se utilizó cartografía del municipio de Avellino, así como datos censales combinándolos con los parámetros LIDAR 3D para complementarlos en cuanto a información como tipología, perfiles de desplante y edad de la construcción.

4. Se aplicó un procedimiento analítico para evaluar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de concreto reforzado basado en un procedimiento de diseño simulado para evaluar las características estructurales del edificio con base a algunos datos, tales como: el número de pisos, las dimensiones globales y el tipo de diseño, y en que se asume un comportamiento tipo cortante para

evaluar de forma rápida la respuesta fuerza-desplazamiento estática no lineal lateral; primero con base a su caracterización por información obtenida por el levantamiento de campo y después, con base a su caracterización obtenida con LIDAR complementada con datos censales.

5.- Se compararon las dos evaluaciones de vulnerabilidad y se discutieron los resultados.

- **Polli (2007)**, plantea la determinación de la evaluación sísmica en la zona de Messina, Italia en base a fusión de información óptica de muy alta resolución y datos de radar de apertura sintética (SAR). El autor diserta sobre los métodos que durante mucho tiempo se han usado y observa que dichos métodos suelen requerir de contar con una gran cantidad de información acerca de las estructuras, lo cual puede representar una severa limitación en cuanto al alcance geográfico del procedimiento de estimación de vulnerabilidad, ya sea porque muchos datos históricos son inexistentes o bien porque la recopilación de datos en sitio puede ser costosa y requiere un gran consumo de tiempo para que sea práctica. Una consideración muy importante que se hace en este trabajo se refiere a que existen dos grandes problemas al momento de pretender extraer un perfil 3D de un edificio, en primer lugar la extracción de la silueta de desplante (*footprint*) en segundo el número de niveles.

El equipo utilizado en este estudio fue un sensor radar aerotransportado STAR-4, realizando seis líneas de vuelo en diferentes azimuts. Así mismo se utilizó una imagen tomada de Google Earth para ubicar un edificio de prueba y extraer de ella la silueta de desplante. Las imágenes de radar se utilizaron para estimar el número de niveles utilizando diversos procesos de filtrado. Finalmente se evaluó la vulnerabilidad de la estructura utilizando un procedimiento analítico simplificado que utiliza como parámetros principales la silueta de desplante (*footprint*) y el número de niveles del edificio.

Los trabajos presentados anteriormente muestran, notoriamente, que la idea de utilizar percepción remota para evaluar la vulnerabilidad sísmica de estructuras ha despertado interés en la comunidad. Así mismo es notorio que pueden existir diversas metodologías y asumir diferentes consideraciones con base a los recursos tecnológicos disponibles; no obstante puede observarse que los autores siguen en sus metodologías tres grandes etapas:

1. Definir los parámetros estructurales que deben obtenerse para realizar el cálculo de la vulnerabilidad sísmica.
2. Determinar que parámetros son factibles de obtenerse por medio de técnicas de percepción remota y cuál es la estrategia a seguir para obtener los que no puedan obtenerse con percepción remota.
3. Definir el tipo de metodología que se aplica para la obtención de la vulnerabilidad sísmica; si es analítica, empírica o una combinación de ambas.

1.2 Objetivos

Objetivo principal.- Analizar la utilidad de datos geoespaciales para obtener parámetros relevantes en la estimación de la vulnerabilidad sísmica de construcciones en zonas urbanas.

Objetivo secundario.- Mostrar la factibilidad de construir mapas de riesgos sísmicos en zonas urbanas a partir de datos geoespaciales.

1.3 Contenido del trabajo

En este trabajo se busca analizar la capacidad de utilizar datos geoespaciales para obtener parámetros útiles para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios en zonas urbanas. El trabajo se divide en cinco capítulos los cuales se resumen a continuación.

En este capítulo 1 se anotan los objetivos que se pretenden alcanzar en este trabajo. Se mencionan algunos trabajos, que sobre el tema, que se han realizado con anterioridad en diversas regiones del mundo; se describen las metodologías, recursos y conclusiones de cada uno; esto sirve de antecedentes y respaldo a algunas consideraciones hechas en este trabajo.

En el capítulo 2 se trata el tema de vulnerabilidad y otros conceptos relacionados, tales como: peligro, riesgo, exposición, susceptibilidad y capacidad de reacción. También se mencionan algunas de las metodologías más utilizadas en la evaluación de vulnerabilidad sísmica de estructuras físicas, sus fortalezas y debilidades.

El capítulo 3 presentan conceptos generales de datos geoespaciales, percepción remota y tecnologías LIDAR; sus principios, plataformas, y productos. Se presentan los razonamientos considerados para

obtener parámetros útiles en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras a partir de datos geoespaciales.

En el capítulo 4 se presenta el marco conceptual del tema tratado en esta tesis, la metodología propuesta en este trabajo, y los pasos que se siguen para alcanzar los objetivos planteados. Aquí se detallan los criterios usados para la recopilación de recursos, su análisis previo, el desarrollo de trabajos de campo y gabinete, y los criterios para generar información útil para evaluar la vulnerabilidad sísmica de estructuras.

El capítulo 5 es la aplicación de la metodología propuesta en el capítulo anterior al espacio definido en la zona del norte de la Delegación Benito Juárez, Ciudad de México. Aquí se presentan datos y estadísticas de la delegación que son necesarios para aplicar la metodología, la problemática particular que presenta, así como las consideraciones específicas que se tomaron para desarrollar la evaluación sísmica de sus estructuras físicas. En este capítulo se presentan también los resultados obtenidos y su análisis.

En el capítulo 6 se plantean conclusiones del trabajo desarrollado, indicando fortalezas y debilidades así como sugerencias para trabajos posteriores.

Capítulo 2. VULNERABILIDAD. CONCEPTOS Y METODOLOGÍAS

2.1 Interrelación entre vulnerabilidad, peligro y riesgo

El concepto de vulnerabilidad está embebido en el marco del riesgo, las Naciones Unidas determinaron que el riesgo de un sistema en particular tiene dos factores: el peligro en sí mismo, el cuál es un evento físico y/o fenómeno o actividad humana potencialmente dañinos y que se caracterizan por su localización, intensidad, frecuencia y probabilidad. El segundo factor es la vulnerabilidad, la cual denota la relación entre la intensidad del peligro y el grado de daño causado, Taubenböck (2008).

A su vez, Rivera (2007) define la vulnerabilidad como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas.

De las definiciones anteriores se observa que la vulnerabilidad se relaciona con el riesgo y peligro sin ser sinónimo de éstos, la relación entre estos conceptos puede plantearse como una ecuación de la siguiente forma:

$$\mathbf{R = P \times V} \quad (2.1)$$

En donde: R = riesgo; P= peligro; V= vulnerabilidad.

Por su parte Taubenböck (S/F) plantea la vulnerabilidad en la siguiente ecuación:

$$\mathbf{V = E \times S / C} \quad (2.2)$$

En donde: V = vulnerabilidad; E= exposición; S= susceptibilidad; C= capacidad de respuesta.

En el caso de los sistemas de infraestructura física de un espacio urbano, dada su naturaleza inmobiliaria los conceptos de exposición, susceptibilidad y capacidad de respuesta para el sistema físico quedan completamente definidos por la localización del sistema dentro de la zona de peligro y por las características de construcción del sistema.

Considerando lo anterior para abordar la vulnerabilidad sísmica de un sistema físico, se debe considerar lo siguiente:

1. Definición del peligro, esto es, los efectos del evento sísmico que pueden generar daños en el sistema. En el caso de los sistemas de infraestructura física, estos efectos se dan a través del medio común entre el evento y las estructuras, éste es, a través del terreno; por lo que el peligro sísmico estará definido por la ocurrencia de un evento sísmico. Una ciudad estará bajo un mayor peligro sísmico cuanto más se conjunten cercanía a una fuente generadora de sismos y propiedades dinámicas adversas del terreno sobre el que se desplante.
2. Definición de la exposición. Un sistema físico se encuentran más expuesto a ser afectado por la acción de un sismo si las características del sitio específico en el que se localiza son tales que propicien una modificación en las ondas sísmicas, efectos de sitio, de modo que resulten desfavorables para las estructuras que forman el sistema. Es importante resaltar que dentro de una zona de peligro sísmico suelen existir áreas de mayor exposición ya que las condiciones locales del sitio son específicas pues difícilmente las características del terreno serán homogéneas en toda la zona; en el caso de grandes zonas urbanas, la situación se complica aún más por diversidad del tipo de construcciones existente en una misma área.
3. Definición de susceptibilidad. A diferencia de los conceptos de peligro y exposición que, en mayor medida, dependen localización y de las características geológicas del terreno; la susceptibilidad de una estructura está en función de sus características constructivas. La forma, dimensiones, tipo de estructuración y la edad de la construcción son parámetros determinantes al momento de evaluar si una estructura es más o menos susceptible de ser afectada por un sismo. El concepto de susceptibilidad está estrechamente ligado con cuestiones antropogénicas y sociales pues las características constructivas de una estructura varían mucho en función de la cultura y nivel socio-económico y cultural de la población, lo que puede ser un factor determinante en el estado de conservación; además una estructura suele trascender al momento histórico en que fue concebida y construida por lo que el tipo de uso que se le esté dando en una época puede ser diferente al que tenía originalmente.

4. Definición de capacidad de respuesta. Al igual que la susceptibilidad, la capacidad de respuesta obedece mucho a cuestiones antropogénicas (sociales, económicas y/o políticas); aunque, para fines de este trabajo se consideran como cuestiones de ésta índole el desarrollo tecnológico y de grado de conocimiento en ingeniería estructural y sísmica. La clase de materiales, sistemas estructurales y filosofías de diseño son muy importante en la evaluación de la capacidad de respuesta de una estructura. Los reglamentos de diseño vigentes en el momento de la construcción son un buen referente para inferir el grado de capacidad de una estructura.

De lo anteriormente anotado, los factores que determinan la vulnerabilidad de una estructura son tanto naturales como antropogénicos; los primeros, generalmente, no son controlables por las decisiones humanas; mientras que los segundos están determinados en su totalidad por estas decisiones.

En los trabajos anotados en el capítulo anterior se presentan algunos parámetros que los autores consideran más trascendentes en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras, a continuación estos se resumen de manera sucinta:

Ricci (2011) usa como datos a) Parámetros geométricos globales, tales como: número de niveles, altura y dimensiones en planta; b) distribución de paneles de relleno; c) tipo de diseño y resistencia de los materiales empleados; d) características de los materiales.

Por su parte Taubenböck (2008) considera que la susceptibilidad y capacidad de reacción están determinadas por la altura, materiales, edad, densidad, tipo de cubierta, código de construcción, medidas de protección y planeación urbana.

Caliskan (2005) evalúa la vulnerabilidad desde un enfoque espacial y considera lo que llama indicadores de vulnerabilidad física, anotando que la altura, material y uso de los edificios son parámetros importantes, pero también considera que aspectos como los espacios abiertos, el patrón de las calles y la densidad y alineamiento de los edificios son factores que influyen al momento de hacer una evaluación de la vulnerabilidad sísmica espacial.

Polli (2007) considera en su trabajo que la silueta de desplante, esto es la forma que tiene la construcción en planta, así como el tamaño y perfil del edificio son parámetros muy importantes para realizar una evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios.

Puede observarse que los parámetros considerados importantes para realizar una evaluación sísmica de

edificios varían con cada autor, no obstante se distingue que los parámetros considerados pueden agruparse en tres grandes categorías:

1. Parámetros geométricos, los cuales son distinguibles por la morfología de la estructura, tales como: la silueta de desplante, la altura, el número de niveles, en función del tipo de función que se utilice para evaluar la vulnerabilidad, y el tipo de cubierta.
2. Parámetros estructurales, que no es factible distinguirlos observando la forma y dimensiones del edificio solamente, en esta categoría se consideran el material de construcción y el sistema estructural empleado.
3. Parámetros históricos, como la edad de la construcción y el código o reglamento con el que fue diseñado el edificio. Estos parámetros sólo pueden conocerse con exactitud de documentación legal del edificio, no obstante pudieran inferirse con cierto grado de precisión de un análisis de los parámetros geométricos y estructurales.

Esta clasificación de parámetros es importante porque permite identificar cuál es la mejor técnica para obtener información sobre ellos; resalta la importancia considerando que este trabajo se enfoca en el uso de técnicas de percepción remota para la obtención de parámetros que permitan evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios. No obstante, es importante decir que esta clasificación de parámetros es tan sólo indicativa, pues en realidad la mayoría de los parámetros que se involucran en la vulnerabilidad sísmica de un edificio se pueden incluir en más de una categoría; por ejemplo, el tamaño de un edificio se ve influenciado por los materiales y sistemas estructurales que se usan o usaron en una época determinada. Sobre esto se profundizará más en los capítulos siguientes.

2.2 Metodologías para evaluar la vulnerabilidad

Las metodologías para evaluar vulnerabilidades pueden ser clasificadas en analíticas y empíricas.

En las metodologías analíticas, en términos generales, es normal que se exprese la vulnerabilidad sísmica a través de una función matemática o matriz de vulnerabilidad con valores entre cero y uno. Esta función de vulnerabilidad es una expresión que relaciona las consecuencias probables de un sismo sobre una construcción o sistema expuesto con la intensidad del temblor que podría generarlas, Rivera (2007).

Por su parte las metodologías empíricas se basan más en la opinión de expertos, en protocolos de recopilación de información del sistema y en determinación de ponderación de cada uno de los parámetros considerados para evaluar la vulnerabilidad.

De manera similar, Peralta (2002) agrupa las metodologías en dos categorías generales: Vulnerabilidad calculada y vulnerabilidad observada.

“En la primera se utilizan técnicas de modelación estructural para simular el comportamiento sísmico bajo cargas dinámicas y resultados de ensayos de materiales en el laboratorio, que sirven para determinar el índice global de daño que puede presentar la edificación, y se calibra a partir del daño real observado de las estructuras sometidas a movimientos telúricos anteriores. Dentro de esta categoría se encuentran los métodos analíticos.”

“Los métodos de la segunda categoría se fundamentan en la observación del daño observado en estructuras durante terremotos, mediante el levantamiento en campo de índices de vulnerabilidad o la opinión subjetiva de expertos sobre el comportamiento sísmico de diferentes tipologías constructivas. Dentro de esta categoría se encuentran los métodos subjetivos o cualitativos.”

No es fácil sugerir que alguna de las dos grandes clasificaciones de metodologías de vulnerabilidad sea mejor que la otra. La aceptación y utilización de alguna de ellas está en gran medida determinada por los alcances y la precisión que se busque, sin embargo es preciso mencionar algunas de las ventajas y limitaciones de cada tipo de metodologías.

Las metodologías analíticas suelen ser utilizadas en evaluación de estructuras en las sea factible conocer, con cierto grado de detalle y profundidad, los principales parámetros estructurales que intervienen en la

capacidad estructural; de esta manera se puede saber, entre otras cosas, el tipo y resistencia de los materiales utilizados y el sistema estructural empleado, así como la filosofía de análisis y diseño; de igual manera se tiene al alcance planos estructurales y memorias de cálculo que permiten conocer los detalles estructurales importantes al momento de determinar la función de vulnerabilidad. No obstante, la aparente exactitud que podrían proporcionar las metodologías analíticas suelen tener limitaciones como la dificultad al momento de modelar numéricamente una estructura real, la calibración del modelo planteado con los daños observados después de la ocurrencia de un sismo, y sobre todo la enorme dificultad que plantearía utilizar una metodología de este tipo para una evaluación de vulnerabilidad sísmica a gran escala si consideramos que las zonas urbanas presentan una enorme heterogeneidad de estructuras en cuanto a tamaño, materiales, edad, sistemas estructurales y estados de conservación de los edificios.

Por su parte las metodologías empíricas parten de una base de datos y, como se ha anotado anteriormente, estas metodologías suelen basarse en el análisis de daños observados por sismos ocurridos así como en opiniones de expertos. Quizás la subjetividad de estas opiniones sea la principal limitante de estas metodologías.

A continuación se anotan de manera sucinta las metodologías de evaluación utilizadas en algunos de los estudios previamente indicados.

Taubenböck (2008), plantea una metodología empírica basada en graficas de vulnerabilidad, que relacionan la intensidad del sismo con el porcentaje de daño esperado, que toman como parámetros principales los indicados en la tabla 1.1, así mismo en la Figura 1.1 se muestran las curvas de vulnerabilidad que utiliza.

ALTURA DEL EDIFICIO	TIPO DE CUBIERTA	EDAD DEL EDIFICIO
De 1 a 3 niveles	Inclinada	Antes de 1975
De 4 a 7 niveles	Plana	Entre 1975 y 1987
Más de 7 niveles		Entre 1987 y 2000
		Después del 2000

Tabla 2.1 Parámetros considerados para la estimación de vulnerabilidad sísmica en edificios, tomado de: Taubenböck (2008)

Localización de edificios, tipo de cubierta, altura y edad del edificio, parámetros estadísticos

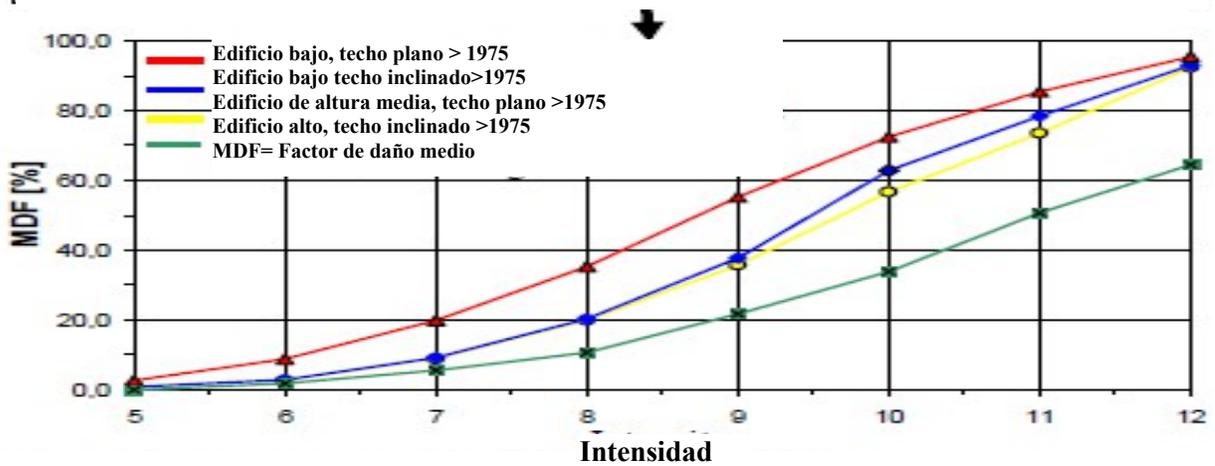


Figura 2.1 Curvas de vulnerabilidad para diversos tipos de edificios. Tomado de: Taubenböck (2008)

Ricci (2011) presenta un método analítico simplificado para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios de concreto reforzado basado en un procedimiento de diseño simulado para evaluar las características estructurales del edificio con base a algunos datos como el número de niveles, dimensiones globales y tipo de diseño, así mismo asume de manera simplificada un comportamiento de cortante para estimar la respuesta lateral fuerza-desplazamiento estática no lineal. La evaluación de la capacidad sísmica lleva a la construcción de curvas de fragilidad que relacionan el parámetro de intensidad sísmica y la probabilidad de excedencia de un elemento de daño (representado por la capacidad de desplazamiento).

Polli (2007) utiliza un método analítico de evaluación de pérdidas por sismo basado en Pushover simplificado (SP-BELA), que se define como un método de evaluación de capacidad sísmica de una estructura y que se asume un comportamiento elasto-plástico perfecto de modo que para definir la curva de capacidad del tipo de edificio basta con calcular la capacidad de desplazamiento en la azotea, en el cual introduce el tamaño de la silueta de desplante y el perfil del edificio como parámetros fundamentales para construir curvas de vulnerabilidad en función al número de niveles de los edificios, Figura 2.2.

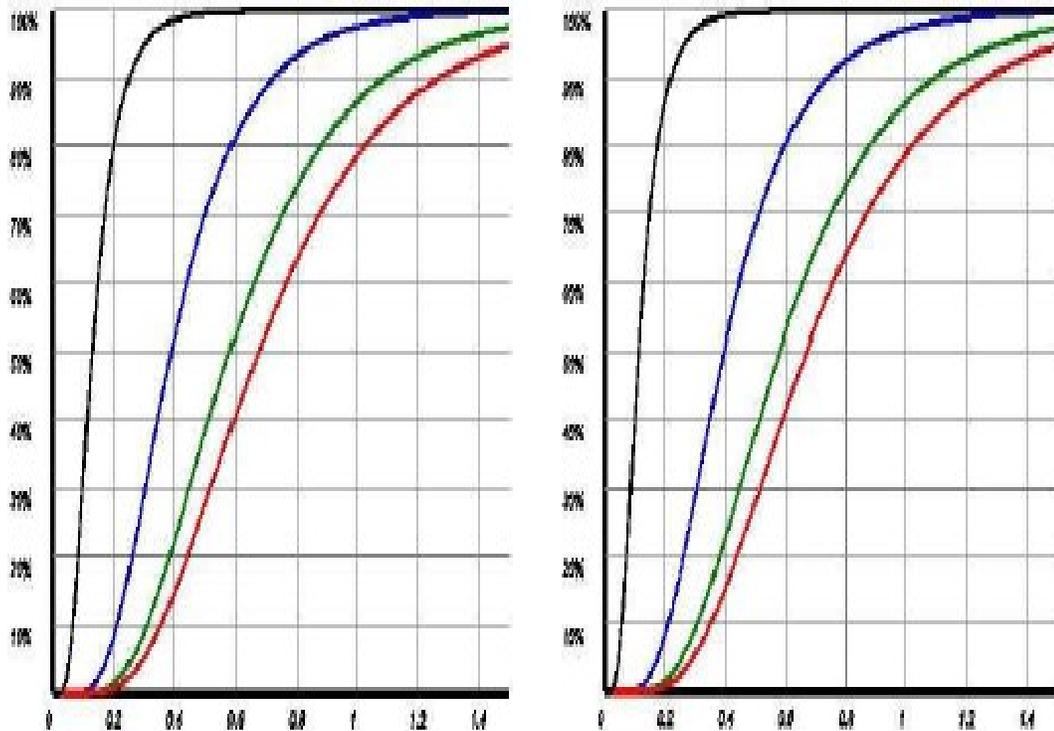


Figura 2.2 Curvas de vulnerabilidad para edificios de 3 niveles (izquierda) y de 4 niveles (derecha). Tomado de Polli (2012)

Como puede verse las metodologías utilizadas en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica a gran escala pueden ser muy variadas, sean estas analíticas o empíricas, por lo que la selección de alguna en particular dependerá, en mucho, de los parámetros que sean factibles de recabar; no obstante debe notarse que los métodos analíticos son limitados para trabajos a gran escala ya que generalmente se basan en modelos aplicables a un tipo de estructura muy definido por lo que necesariamente se deberá recurrir a una metodología empírica, lo más adecuado es utilizar una combinación de ambas.

Capítulo 3. DATOS GEOESPACIALES Y PARÁMETROS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE CONSTRUCCIONES

3.1 Conceptos generales

Para representar los hechos y procesos geográficos mediante mapas, tanto analógicos como digitales, es necesario guiarse por un conjunto de pautas que permiten reducir, en tamaño y complejidad, las entidades reales a las características de la representación cartográfica. La forma más eficaz de realizar este proceso es establecer modelos que guíen la conversión de los entes geográficos a su representación gráfica. Así, las ciudades de un país se pueden representar mediante puntos, sus ríos mediante líneas y las divisiones municipales mediante polígonos. En este caso se utiliza un modelo vectorial (puntos, líneas y polígonos) con el cual se trasladan las entidades geográficas a elementos simples. Un modelo es una representación de la realidad y que se genera mediante la selección y simplificación de sus partes. Para que sea geográfico, el modelo ha de poseer un sistema de referenciación, (Moreno, 2008).

La representación gráfica de estos hechos y proceso ha llevado a un debate sobre dos formas de representación espacial: campo u objeto. Este debate puede argumentarse desde el dilema filosófico en la Grecia antigua acerca de la naturaleza de la realidad: ¿Es un campo de fenómenos variando continuamente ó es un contenedor vacío lleno de objetos diferentes?. En la práctica de los sistemas de información geográfica este debate suele abordarse en función de lo que quiere representarse, mediante dos tipos de datos geoespaciales: el vector y el raster. Por la naturaleza y características de cada uno de estos tipos de datos, sobre los cuales se profundizará más adelante, es posible ligar el concepto de vector a una naturaleza de un espacio que contiene diferentes tipos de objetos; mientras que el raster es más afín a un campo de fenómenos en constante variación.

Modelo vectorial

El modelo vectorial ha sido la base de la cartografía analógica clásica, puesto que resulta particularmente útil para representar entidades geográficas discretas, como edificios, carreteras ó límites municipales. Puntos, líneas y polígonos son los elementos geométricos básicos y basan su representación en vértices y segmentos. Un vértice es el elemento vectorial más simple y resulta del cruce de dos coordenadas X e Y, dependiendo sus valores de las características del sistema de referencia utilizado. Los puntos se representan por un único vértice, que se define geoméricamente por sus valores X-Y. Las líneas están formadas por uno o varios segmentos articulados por vértices con sus respectivas coordenadas. A los vértices de los extremos les denominamos nodos y marcan el inicio y el final de las líneas y en

consecuencia, el sentido de su dirección. Los polígonos son líneas cerradas donde los nodos de inicio y final coinciden, delimitando en su interior un área (Moreno, 2008).

Los elementos vectoriales se convierten en objetos cuando su representación se asocia a entidades reales: una línea puede ser la representación del discurrir de un río. Podemos guardar determinados atributos de estas entidades reales, como el caudal o su longitud, en bases de datos y asociar, mediante identificadores (ID), cada objeto a sus atributos. Dado que asociamos los objetos bajo un sistema de coordenadas, es posible deducir las relaciones topológicas que mantienen entre sí, tales como la proximidad, la conectividad o la inclusión. La variedad de formas existentes para ordenar y almacenar informaciones geométricas, de atributos y topologías dan lugar a la existencia de diferentes formatos (Moreno, 2008).

Modelo raster

Los datos en formato raster pueden presentarse de muy diversas formas: en una sola banda como mapa temático donde las celdas se agrupan numéricamente y cromáticamente según sus características comunes; como fotografías aéreas con una o tres bandas (blanco y negro o color); o como imágenes de satélite con numerosas bandas de información. En cualquier caso constituyen una importante fuente de información geográfica, de representación y, especialmente, de análisis. Esta nueva forma de mostrar datos geográficos y sus relaciones requiere también de un modelo. En un modelo raster la representación del mundo real no es discreta, como normalmente sucede en el vectorial (representada o interrumpida por puntos y líneas), sino continua, mediante una superficie dividida en discretas celdas regulares, que denominamos cuadrícula o grid, y donde cada una de las celdas son conocidas con el nombre de pixel (abreviatura de *picture* o su diminutivo *pix* y *element*, o elemento mínimo de representación. En estos modelos basados en celdas, cada pixel representa una cualidad cuantificable de observación, la mínima, representada en cada localización mediante un tono o color, se traduce en un valor numérico o nivel digital (ND). Los formatos raster o de imagen siguen las normas generales de las imágenes digitales, aunque, dadas las grandes posibilidades que las mismas ofrecen para los análisis territoriales, algunos de los formatos utilizados presentan características propias. La estructura de una imagen es similar a una malla, normalmente regular, a cuyas celdas se les asigna un número (ND). Este número suele asociarse a un color, lo que finalmente conforma la apariencia visual de la imagen. En ocasiones, cada celda representa no una característica visual del espacio sino otra cosa, como por ejemplo la altitud de cada pixel, la pendiente, la orientación o cualquier otra característica continua del territorio; es entonces cuando hay que asociar a la imagen una paleta de color determinada para que represente en cada caso lo que más interesa. Cuando los pixeles representan un valor de altitud hablamos de un modelo digital de elevaciones (MDE, en ocasiones MDT en alusión al terreno, o DEM en sus siglas inglesas) Moreno (2008).

Las variadas situaciones en las que se utilizan datos raster van a conllevar ciertas variaciones sobre la estructura básica de la cuadrícula. Además, la información que representa ha de estar, como en los documentos vectoriales, asignadas a unas coordenadas, geográficas o cartográficas. Todas estas capacidades de representación y análisis han ido creando una variedad grande de formatos. Cuantas más pequeñas sean las celdas de la cuadrícula en la representación una porción del espacio, mayor resolución y mayores detalles se podrán apreciar. No obstante, como las celdas forman una superficie regular, a menor tamaño, mayor número de celdas y, en consecuencia, mayor información será necesario almacenar y tratar. Si consideramos, además, que la precisión espacial es siempre mayor en la representación vectorial que en la raster, por cuanto una línea ofrece una división más nítida que un conjunto de celdas, comprenderemos que en precisión y peso de los archivos, el modelo vectorial aventaja al raster. A grandes rasgos, se puede asociar el modelo raster a la representación y el análisis de superficies continuas donde las transiciones no se presentan de una forma brusca (en general, los aspectos naturales como la vegetación o las rocas), en cambio, cuando representamos entidades creadas por el hombre (como una división municipal o el trazado de una carretera), la precisión es fundamental.

Como se ha señalado, las celdas de un raster representan datos derivados (resúmenes de luminancia media de altitud para la superficie abarcada por cada pixel, pendiente, producto de la distancia e inclinación entre cada celda, etc.). Pueden ser creadas mediante la conversión de datos vectoriales, por medidas en determinados puntos o mediante clasificación de una imagen previa, como la obtención de usos de suelo partiendo de imágenes de satélite. También, almacenar valores continuos, como elevaciones de terreno, o categorías, como los tipos de vegetación. Al almacenar una categoría, es posible adicionar atributos a esa categoría. Las diversas circunstancias en las que es posible utilizar modelos raster van a afectar a diversos aspectos de su estructura. Afectarán al valor asignado a la celda o pixel y en este sentido hay que distinguir entre el tipo de número que se le asigna (byte, entero real), pudiendo presentarse tanto en código ASCII como binario, y presentar compresiones o no. También variará la unidad de medición con el que se le relaciona, pudiendo ser esta nominal (usos de suelo), ordinal/intervalo (elevaciones), porcentaje (pendientes en %). Podrá variar, además, el número de bandas que posee, existiendo raster formados por una única banda o monobanda o por un número variable de bandas, o multibanda. Entre las últimas podemos distinguir las composiciones cromáticas RVA/RGB, las multiespectrales, como las imágenes de siete bandas de satélites Landsat, y las hiperespectrales, con varias decenas de bandas, de los sensores más modernos como HyMap con 200 o el Hyperion con 220. Finalmente, señalar que al representar fenómenos espaciales, las celdas llevan asignadas coordenadas, (Moreno, 2008).

III.2 Percepción remota

La percepción remota o teledetección se define, de manera sucinta, como la técnica de obtener información de objetos sin tener contacto directo con ellos. Chuvieco (2002) interpreta que la teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su tratamiento posterior, en el contexto de una aplicación determinada. Así mismo plantea que un sistema de teledetección espacial incluye los siguientes elementos, Figura 3.1:

1. *“Fuente de energía, que supone el origen de la radiación electro-magnética que detecta el sensor.*
2. *Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que recibe la señal energética procedente de la fuente de energía, y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.*
3. *Sistema sensor, compuesto por el sensor propiamente dicho, y la plataforma que lo alberga. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.*
4. *Sistema de recepción comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado, y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los interesados.*
5. *Intérprete, que convierte esos datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente, de cara a facilitar la evaluación del problema en estudio.*
6. *Usuario final, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.”*

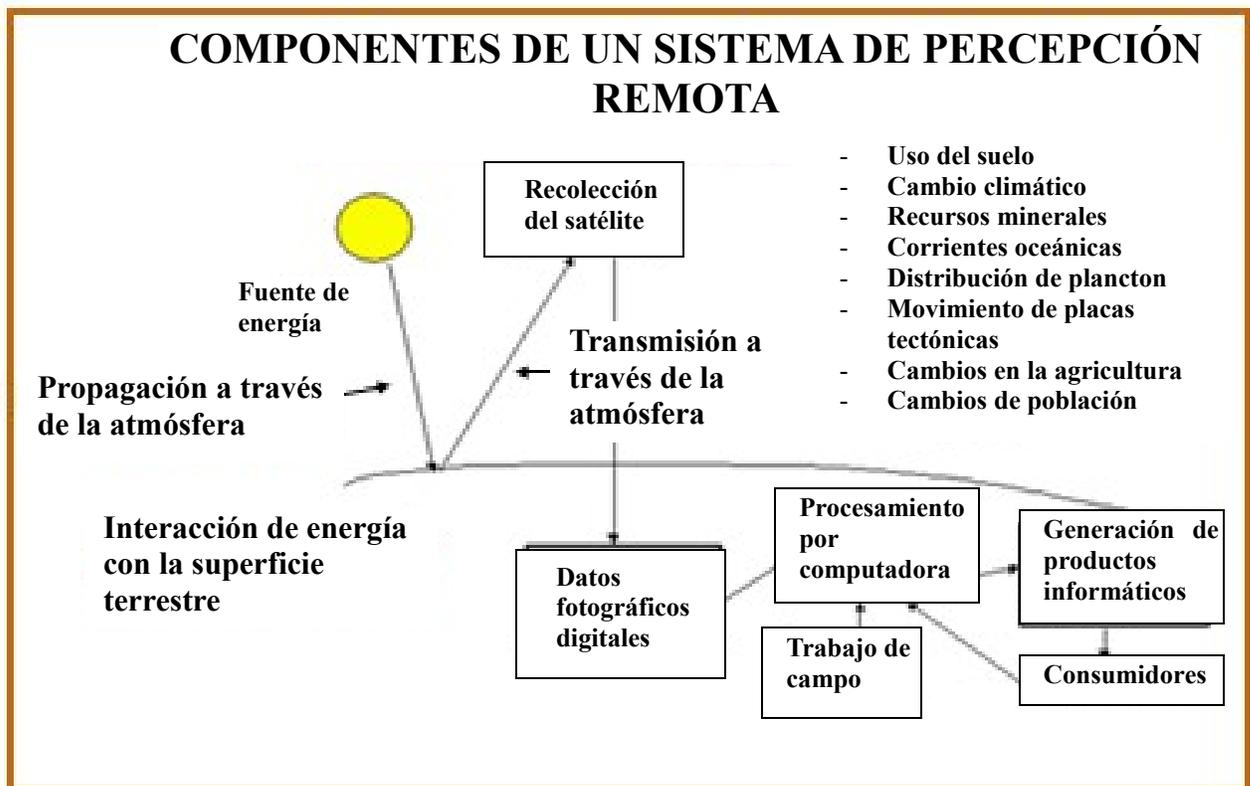


Figura 3.1 Componentes de un sistema de percepción remota. Tomado de: Chuvieco (2002)

Es importante indicar que, si bien, Chuvieco (2002) hace énfasis en sistemas de teledetección espaciales, lo que anota puede aplicarse en general a otros tipos de plataformas tales como aerotransportadas o terrestres; de igual manera lo que él llama *cobertura terrestre*, puede generalizarse a cualquier otro objeto sobre el que incide la energía y cuya emisión es captada por el sensor. A manera de resumen podría decirse que un sistema percepción remota se compone fundamentalmente de elementos físicos (un sensor, un objeto de estudio y un producto generado de la interacción de la energía emitida y recibida entre el sensor y objeto), y elementos de análisis (técnicas de procesamiento, algoritmos, software y demás elementos no físicos).

Se ha hablado del concepto de energía, que es la encargada de generar una interacción entre el sensor y el objeto, en percepción remota este concepto se relaciona a la energía electromagnética y muy concretamente al espectro electromagnético, Figura 3.2.

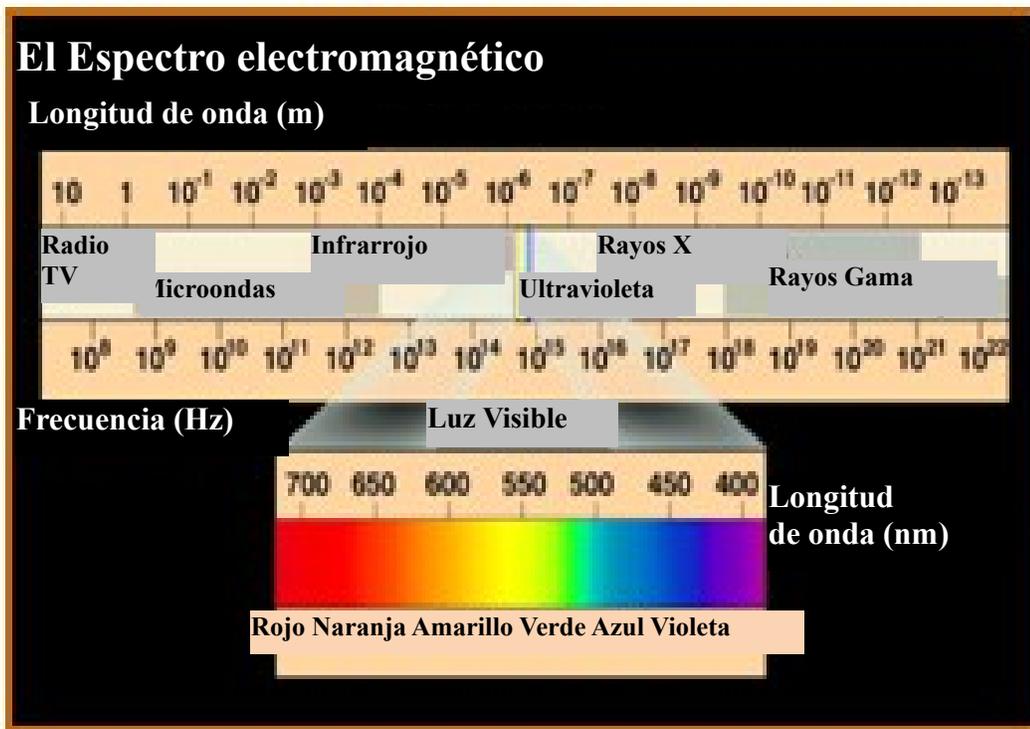


Figura 3.2 Espectro electromagnético. Tomado de Chuvieco (2002)

El espectro electromagnético puede entenderse como un condensado de señales en el que cada rango se relaciona con longitudes y amplitudes de onda y frecuencias específicas que se agrupan en rangos, algunos de estos rangos comúnmente usados en percepción remota son:

- Ultravioleta. 0.4 micrómetro.
- Visible. 0.4 a 0.72 micrómetro.
- Infrarrojo. 0.72 a 15 micrómetros.
- Microondas. 1 milímetro a 1 metro.

Ahora a profundizar un poco en los principales componentes de un sistema de percepción remota:

1. Las plataformas pueden definirse como los vehículos que transportan los sensores para la toma de imágenes. Pueden ser de tres tipos fundamentalmente:

Terrestres, cuando el vehículo se mantiene a nivel de tierra, generalmente son automotores especialmente adaptados para montar en ellos los sensores.

Aéreos, cuando el vehículo es capaz de volar, generalmente son aviones, aunque en ocasiones se utilizan helicópteros.

Espaciales, cuando el vehículo es un satélite.

2. Los equipos son los sensores capaces de generar imágenes u otros productos para análisis. Los sensores pueden clasificarse en dos grupos:

Activos, cuando el sensor posee una fuente de energía propio capaz de generar una señal electromagnética que se dirige a la superficie o cubierta objetivo y posteriormente recibir la señal que regresa después de interactuar con la superficie o cubierta.

Pasivos, cuando el sensor no genera una señal y tan sólo es capaz de captar las señales que emiten las superficies, en este tipo de sensores la señal original suele ser la energía solar.

3. Los productos son generados por los sensores y constituyen el material de análisis, los productos son generalmente imágenes y/o fotografías en una gran variedad de resoluciones espaciales, espectrales y temporales de acuerdo a las capacidades del sensor y de la plataforma, aunque en ocasiones son nubes de puntos en el caso de sensores de escaneo tipo LIDAR, o bien imágenes RADAR.

3.3 **Tecnologías LIDAR**

¿Qué es LIDAR?

LIDAR, también conocido como LADAR o altimetría laser se refiere a una técnica de percepción remota que emite haces de *luz* intensa y focalizada y mide el tiempo que le toma al sensor detectar las reflexiones. Esta información se usa para calcular *rangos* o distancias a los objetos. De esta manera, LIDAR es análogo al radar (radio detecting and ranging), excepto que se basa en pulsos discretos de luz laser. Las coordenadas tridimensionales (x y z) o latitud, longitud y elevación de los objetos se calculan: de 1) la diferencia de tiempo entre la emisión y retorno del pulso laser, 2) el ángulo en el cual el pulso se disparo,

y 3) la localización absoluta del sensor sobre o encima de la superficie terrestre, Figura 3.3.

LIDAR, Light Detection and Ranging, ha llegado a ser un eficaz método de recolectar datos de elevación con gran precisión a través de terrenos, áreas de aguas de poca profundidad y proyectos de construcción entre otros. Esta técnica activa de percepción remota es similar al radar pero usa pulsos de luz láser en lugar de ondas de radio.

LIDAR típicamente es aéreo si desde aviones se recolectan rápidamente puntos sobre grandes áreas; o terrestre, si la recolección de datos se hace con plataformas estacionarias o móviles en tierra. Estas técnicas de recolección de datos son populares dentro de las comunidades de topografía e ingeniería por permitir producir densidades de puntos con muy alta precisión, permitiendo así desarrollar representaciones precisas, realistas y tridimensionales de vías, caminos, puentes, edificios, escolleras y otras estructuras. La recolección de datos de elevación usando LIDAR tiene varias ventajas sobre la mayoría de otras técnicas; entre ellas destacan mejores resoluciones, precisiones de centímetros y detección de suelo en terrenos arbolados, (NOAA, 2012).

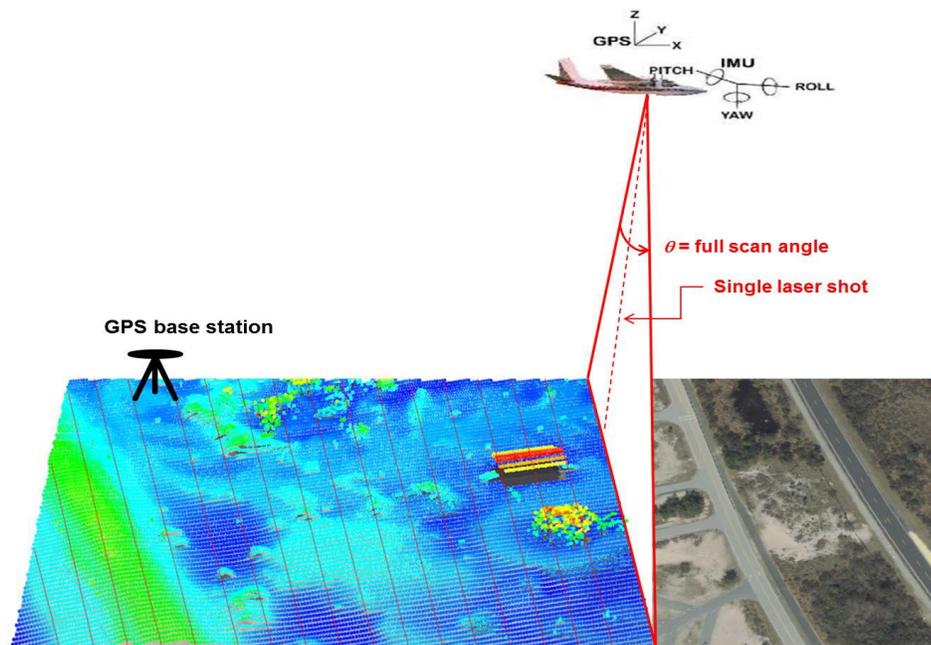


Figura 3.3 Diagrama esquemático de operación de un LIDAR aerotransportado haciendo escaneo en línea, resultando en líneas paralelas de puntos medidos. Tomado de: (NOAA, 2012)

Al ser un sensor activo, LIDAR permite recolectar datos de noche, que es cuando generalmente el aire es más claro y hay menos tránsito aéreo en el cielo; pues a diferencia del radar, LIDAR no puede penetrar nubes, lluvia o polvo denso por lo que los vuelos deben realizarse con clima despejado.

Los instrumentos LIDAR puede barrer rápidamente la superficie terrestre en tasas de muestreo de 150 kHz (150,000 pulsos por segundo). El producto resultante es una red densamente espacializada de puntos de elevación georeferenciada con gran precisión, comúnmente llamada nube de puntos, y que puede utilizarse para generar representaciones tridimensionales de la superficie terrestre y sus atributos. Muchos sistemas LIDAR operan en la región infrarroja del espectro electromagnético, mientras que algunos sensores también operan en la banda verde para penetrar superficies de agua y detectar atributos del fondo. Esta batimetría LIDAR puede emplearse en zonas de agua relativamente clara para medir elevaciones del fondo del mar. Típicamente, la precisión absoluta de las elevaciones derivadas de LIDAR son del entre 15 y 30 cm para los datos más antiguos y de entre 10 y 20 cm para los más recientes; las precisiones relativas, por ejemplo, alturas de azoteas, colinas, bancos y dunas, son mejores aún.

La habilidad de “ver bajo los árboles” es una meta recurrente cuando se adquieren datos de elevación usando recolecciones de datos por percepción remota. Muchos de los conjuntos de datos de elevación a gran escala han sido generados con técnicas de percepción remota que no pueden penetrar la vegetación.

LIDAR no es la excepción, sin embargo, hay típicamente suficientes puntos individuales que, aunque sólo sea un pequeño porcentaje, permiten detectar el suelo en zonas arboladas. En efecto, LIDAR puede ver a través de los agujeros en las copas de los árboles o en la vegetación.

Terminología básica

Cualquier discusión sobre LIDAR debe incluir términos técnicos que describen el nivel de precisión (un aspecto muy importante de los datos LIDAR), recolección de datos y los pasos de procesamiento. A continuación se anotan los términos más relevantes:

LAS.- Abreviación de laser file format; los archivos en formato LAS son formatos de archivos públicos para el intercambio de datos de nube de puntos tridimensionales entre usuarios. Ya que se desarrolló para el intercambio de nubes de puntos, este formato soporta el intercambio de cualquier información tridimensional x, y, z. LAS es un formato de archivo binario que mantiene información específica de naturaleza de los datos LIDAR mientras ésta no sea demasiado compleja.

RMSE.- Abreviación para root mean square error una medida de la precisión de los datos similar a la medida de desviación estándar.

Precisión, Fundamental Vertical Accuracy (FVA).- una medida de la precisión de los datos en áreas abiertas en un nivel de confianza (95%); calculada del RMSE usando la fórmula $RMSE \times 1.96 = FVA$.

Clasificación.- Datos que han sido procesados para definir el tipo de objeto que ha reflejado los pulsos, puede ser tan simple como no clasificado hasta edificio o vegetación alta. Lo más común es clasificar los conjuntos de datos por puntos que son considerados “suelo desnudo” y los que no lo son (no clasificado).

Número de retorno (primer/último retorno).- Muchos sistemas LIDAR son capaces de captar el primer, segundo, tercer y finalmente el “último retorno” de un solo pulso laser. El número de retorno puede usarse para ayudar a determinar de dónde se refleja el pulso (suelo, árbol etc.).

Espaciado de puntos.- Que tan cercanos están unos de otros los puntos laser, análogamente al tamaño del pixel en imágenes aéreas; también llamado “densidad de posición” o “espaciado nominal de puntos”. El espaciado de puntos determina la resolución de malla de los productos derivados.

Tasa de pulsos.- El número de disparos discretos laser por segundo que hace el instrumento LIDAR. Los sistemas usados en 2012 eran capaces de hasta 300,000 pulsos por segundo. Comúnmente los datos se capturan entre 50,000 y 150,000 pulsos por segundo.

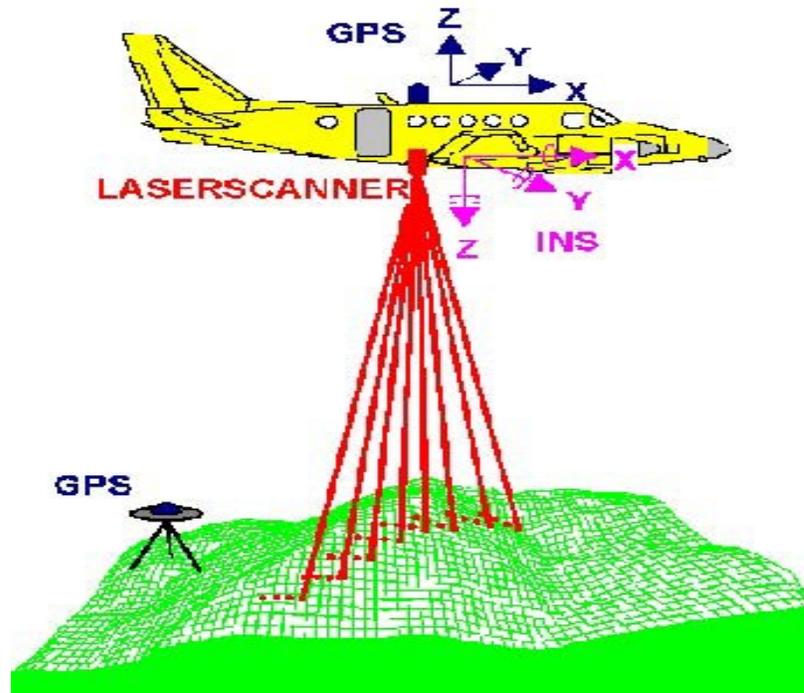
Intensidad de datos.- Cuando el laser retorna es grabado, la fuerza del retorno también se graba. Los valores representan que también el objeto refleja la longitud de onda de luz utilizada por el sistema laser (1,064 nanómetros para los sensores de topografía comerciales en USA). Estos datos parecen una fotografía blanco y negro pero no puede interpretarse exactamente de la misma manera.

RTK GPS (Real Time Kinematic).- El satélite de navegación que usa la fase portadora (una forma de onda) que transmite (porta) la señal del sistema de posicionamiento global (GPS) en lugar de la señal GPS en sí. La señal GPS actual tiene una frecuencia de cerca de 1 megahertz, mientras que la onda portadora tiene una frecuencia de 1500 megahertz, así una diferencia en el tiempo de arribo de la señal es más precisa. La fase portadora es más difícil de usar (el equipo es más costoso); sin embargo, una vez resuelto, produce una precisión de posición en relación a una frecuencia más alta.

DEM, modelo digital de elevación.- Una superficie creada de los datos de puntos de elevación para representar la topografía. Frecuentemente un DEM se usa más fácilmente en sistemas de información geográfica (SIG) o en aplicaciones de diseño asistido por computadora (CAD) en vez de los datos de puntos crudos del que se construye.

Principios básicos y técnicas

La idea básica es medir el tiempo que toma al pulso laser golpear un objeto y retornar al sensor (el cual tiene una localización conocida por sistemas de georeferencia directa), determina la distancia usando el tiempo de viaje, el ángulo del laser, y después, de esta información, calcula donde se localiza en tres dimensiones el objeto reflejado, Figura 3.4.



**Figura 3.4 Esquema básico de recolección de datos LIDAR desde un avión.
Tomado de: NOAA (2012)**

En realidad, para lograr un alto nivel de precisión, (más/menos un centímetro) este proceso es un poco más complicado ya que es importante conocer dónde está el avión mientras vuela a 100 o 200 millas por hora, bamboleándose arriba y abajo, mientras traza miles de pulsos laser por segundo. Afortunadamente, diversas tecnologías (especialmente GPS y giroscopios de precisión) han permitido hacer esto posible.

Algunas unidades de medición inercial (IMU) o sistemas de navegación inercial (INS) más avanzados han hecho posible instrumentar la posición exacta del avión. Estos sistemas son capaces de medir el movimiento en todas direcciones y considerar esta medidas en la posición. Sin embargo no son perfectos y hay una pérdida de precisión después de un corto tiempo (1 segundo), por lo que se usa una unidad GPS altamente sofisticada para actualizar o “resetear” la unidad IMU o INS cada segundo. Las posiciones GPS son grabadas por el avión y también en estaciones en tierra con posición conocida. La estación de tierra proporciona un factor de corrección a la posición GPS grabada por el avión.

Los sistemas LIDAR han avanzado considerablemente. Las primeras unidades comerciales eran capaces de captar 10,000 puntos por segundo (10 kHz) y eran grandes y voluminosos. Los sistemas más recientes son más compactos y ligeros, tienen mayor precisión angular, y pueden procesar múltiples retornos laser

en la plataforma en vuelo (un segundo disparo laser se emite antes de que se reciba el retorno del disparo laser previo), permitiendo tasas de pulsos sobre 300,000 por segundo (300 kHz).

Los sistemas de múltiples retornos, los cuales son comunes, pueden capturar hasta cinco retornos por pulso, esto puede incrementar la cantidad de datos en un 30% o más (de 100,000 pulsos/segundo a 130,000) e incrementa la habilidad de mirar en una estructura tridimensional los atributos arriba de la superficie del suelo, tales como copas de árboles y entrepisos, Figura 3.5, NOAA (2012).

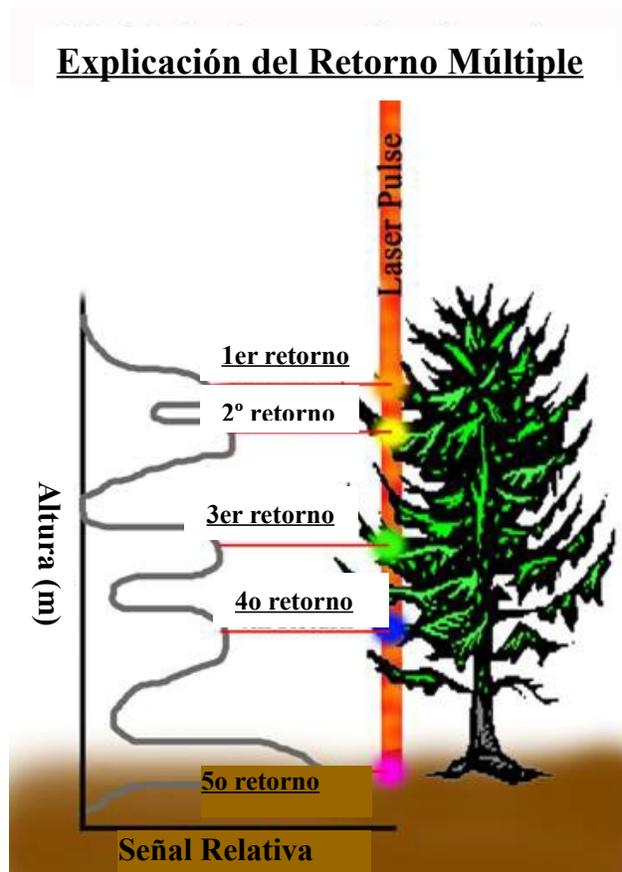


Figura 3.5 Múltiples retornos de un solo pulso, (NOAA, 2012)

Tipos de datos

Como muchos datos de altimetría, los datos LIDAR pueden almacenarse en una amplia variedad de formatos. Los datos nativos se entregan como puntos (nube de puntos) que pueden ser procesados para crear DEM's o TIN's (superficies); las superficies pueden usarse para producir contornos (líneas).

Puntos

Comúnmente se almacenan en formato LAS. Los datos LIDAR pueden contener significativamente más información que valores x, y, y z, y que pueden incluir, entre otros, la intensidad de retorno, la clasificación de puntos, Figura 3.6, el número de retornos, el tiempo y la fuente (línea de vuelo) de cada punto. Esta información también puede venir en archivos de formato de texto, sin embargo, el tamaño puede ser considerablemente grandes (varios millones de registros con muchos caracteres de texto), haciendo difícil trabajar con ellos.



Figura 3.6 Puntos coloreados por elevación. Tomado de: NOAA (2012)

Modelos digitales de elevación, DEM

Los DEM comúnmente son archivos raster con formatos que incluyen GeoTiff (.tif), Esri Grid (.adf), raster de punto flotante (.flt), o ERDAS Imagine (.img). En algunos casos los datos están disponibles en formato TIN (Esri TIN). En los casos raster, pueden crearse usando archivos de puntos y pueden interpolarse usando diferentes técnicas. Las técnicas usadas para crear DEM's van desde lo simple (vecinos cercanos) a complejas rutinas de mallado (kriging) y pueden, generar tipos de interpolación de superficie ligeramente diferentes. Los más comunes son superficies creadas desde un TIN o por ponderación de rutinas de distancia inversa (IDW). Los métodos apropiados de interpolación dependen de los datos y del uso que se le quiere dar al DEM, Figura 3.7.

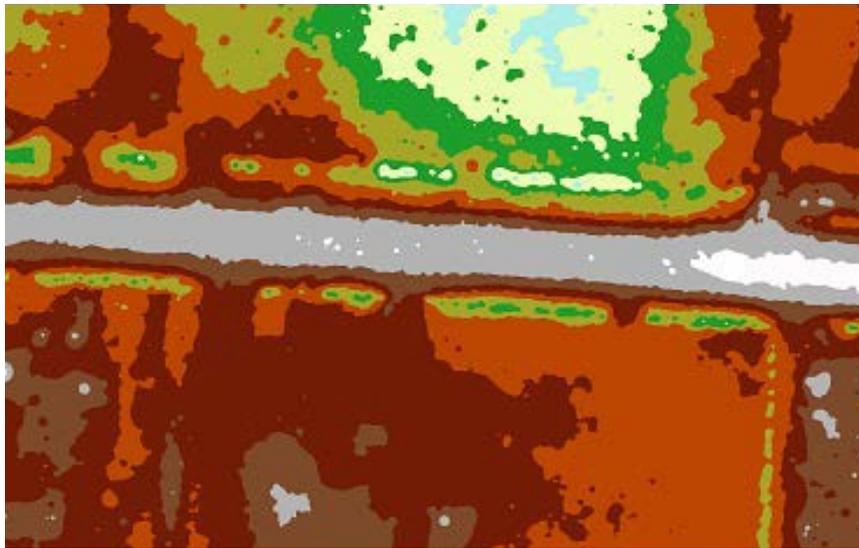


Figura 3.7 Raster DEM creado con una rutina IDW. Tomado de NOAA (2012)

Contornos

Comúnmente están disponibles en formato vectorial (.shp, .dxf) y son muy frecuentemente derivados de un DEM o TIN pre-construido. Los contornos derivados directamente de datos LIDAR son precisos pero no “limpios” y pueden requerir de un nivel de interpolación, simplificación, suavizado, o edición manual para generar un producto que pueda interpretarse más fácilmente por el ojo humano. En este proceso de limpiado y editado de vectores, la posición de contornos puede cambiar ligeramente y algunos atributos pequeños pueden incluso ser eliminados. Esta relación entre precisión e interoperabilidad se acepta comúnmente como contornos derivados de LIDAR. Los contornos comúnmente se usan con propósitos cartográficos mientras que los DEM's o TIN's originales se usan con fines analíticos.

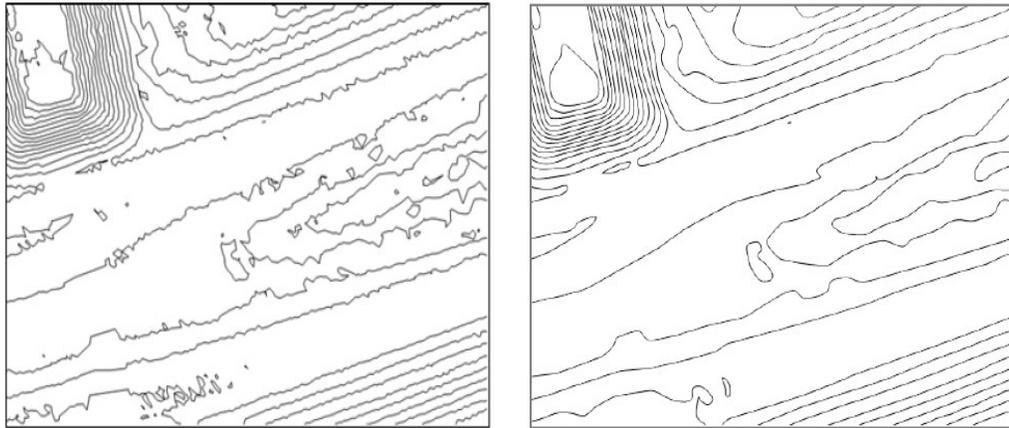


Figura 3.8 Contornos generados con datos LIDAR. Derivado directamente de la fuente LIDAR, izquierda. Editado para generar un productos más intuitivo pero con menor precisión, derecha. Tomado de: NOAA (2012)

3.4 Parámetros para evaluar la vulnerabilidad sísmica de construcciones

Como se anotó en el apartado 3.1 de este capítulo, muchas de las ventajas que se puedan obtener de los datos geoespaciales están en función del modelo que se dispone. En este sentido el formato vectorial ofrece una notable ventaja para representar entidades u objetos creados por el hombre, tales como los edificios presentes en una zona urbana ya que en la base de datos relacionada al formato vectorial de datos es posible asignarle a cada objeto una serie de atributos de los cuales es posible inferir, con cierto grado de precisión, información adicional útil sobre el objeto.

El catastro de una ciudad es, en resumidas cuentas, el inventario de los inmuebles que se ubican en su territorio. En una base de datos geoespaciales catastral a cada objeto, en este caso cada inmueble, se le asignan una serie de atributos que lo definen como único dentro del universo de objetos contenidos en la base. Así, de la base catastral es posible conocer el área construida, el número de niveles con que cuenta, el uso asignado al inmueble, el año en que fue construido, además de su precisa localización geográfica. Estos atributos permiten dibujar mentalmente una tipología, lo que nos proporciona un conocimiento, en su mínima expresión si se quiere, del objeto, es decir del inmueble; en este caso su forma. Esta forma de la construcción da paso a una clasificación en tipos de construcción con base en su tamaño, altura y proporción altura-área.

A partir de la forma de la construcción, puede ser posible inferir que tipo de estructuración y de que materiales puede estar construido el inmueble, pues esto no es factible de obtener mediante percepción remota, mediante un razonamiento de que, por un lado, el tamaño y forma determinan el peso de la estructura; el peso se relaciona a la demanda sísmica de la construcción en función de su localización geográfica y de la normativa vigente en materia de construcción. Por otro lado, del atributo referido al año de construcción, es posible inferir la calidad de los materiales con que está construido, la filosofía de diseño estructural con que se construyó y para qué demanda sísmica se diseñó; esto con base a la normativa de construcción vigente en la época de construcción del edificio. Esta inferencia de parámetros requiere un conocimiento sobre los materiales y sistemas de construcción que son de uso común en la zona que se estudió, para este caso en particular son mayoritariamente sistemas estructurales a base de muros de mampostería y marcos de concreto reforzado.

Entre los parámetros relevantes que influyen en la capacidad de una estructura pueden anotarse los siguientes:

- Sistema estructural
- Tipo y resistencia de materiales de construcción
- Edad de la construcción
- Estado de conservación
- Filosofía de diseño

De acuerdo a los razonamientos planteados anteriormente, los datos geospaciales catastrales en formato vectorial pueden ser muy útiles para inferir, con cierto grado de precisión, parámetros relevantes sobre la vulnerabilidad sísmica de una estructura urbana. No obstante el estado de conservación no es posible obtenerlo de información catastral.

Como se anotó anteriormente el catastro es un inventario de inmuebles, este inventario se actualiza con cierta periodicidad, muchas veces no con la requerida, o más aún en algunas ocasiones la dinámica de construcción de una urbe rebasa la capacidad del organismo catastral para la actualización de sus datos. Es aquí en donde otro tipo de datos geospaciales resultan de suma valía, los datos raster recolectados por percepción remota.

La percepción remota dadas sus características, esbozadas anteriormente, es capaz de recolectar grandes cantidades de datos en áreas muy grandes y en poco tiempo. Como ya lo ha asentado NOAA (2012) para el caso específico de tecnologías LIDAR, estas técnicas de recolección de datos son populares dentro de las comunidades de topografía e ingeniería por permitir producir densidades de puntos con muy alta precisión, permitiendo así desarrollar representaciones precisas, realistas y tridimensionales de vías, caminos, puentes, edificios, escolleras y otras estructuras. La recolección de datos de elevación usando LIDAR tiene varias ventajas sobre la mayoría de otras técnicas; entre ellas destacan mejores resoluciones, precisiones de centímetros y detección de suelo en terrenos arbolados, NOAA (2012).

Un adecuado manejo, tratamiento y organización de datos LIDAR puede ayudar en mucho a agilizar la actualización catastral para fines de evaluación de vulnerabilidad sísmica de construcciones; esto ya que permite obtener con precisiones de centímetros las alturas de las construcciones, y que con tratamientos adecuados del raster, obtener áreas de las mismas. Estos dos atributos, área y altura configuran la forma de la construcción, a partir de la cual se pueden inferir varios parámetros relevantes para la evaluación de vulnerabilidades sísmicas

Capítulo IV. METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1 Marco conceptual

Como se ha dejado plasmando en capítulos anteriores el concepto de riesgo puede abordarse de diversas formas. Si bien puede plantearse de una manera ingenieril como una relación simple en función de peligro y vulnerabilidad, en la realidad es un concepto complejo en que intervienen una gran cantidad de parámetros, tanto en su construcción como en su interpretación.

En el caso particular del riesgo sísmico de edificios, muchos de estos parámetros son netamente probabilísticos, principalmente aquellos referentes al peligro, así como a la exposición. Por otro lado, parámetros relacionados a la capacidad de reacción y susceptibilidad son generados, en la mayoría de los casos, de manera determinista pues están regidos por reglamentos de construcción.

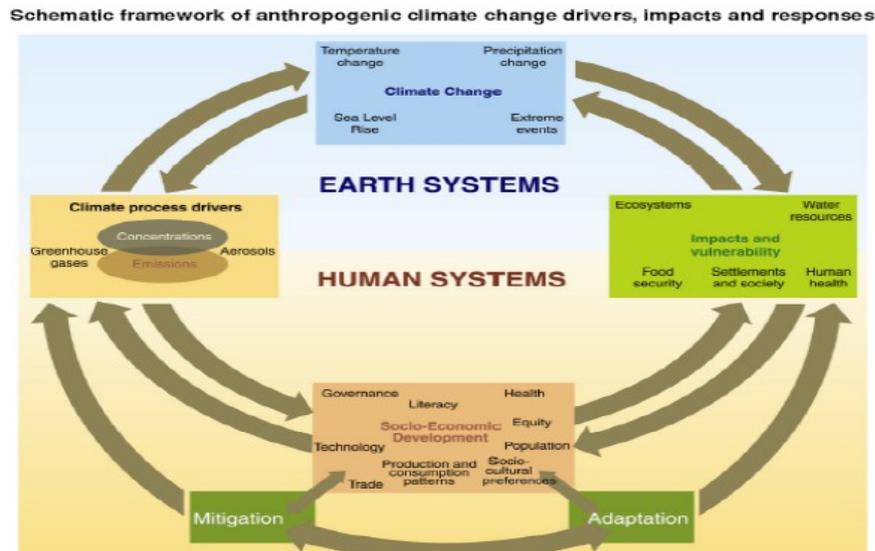
Aunado a lo anterior, los reglamentos de construcción evolucionan en función a la adquisición de nuevo conocimiento. Un nuevo conocimiento se da, por un lado, respecto a materiales, sistemas estructurales, tecnologías de construcción y filosofías de diseño; y por otro, la concepción de peligro y exposición también se modifican en función a la intensidad de los fenómenos naturales que se presenten.

Además de lo anterior, las estructuras construidas se ven modificadas a lo largo de su vida útil por cambios en reglamentos, usos de suelo e inclusive cambios en las condiciones del suelo sobre el que se desplantan, además del envejecimiento mismo de la estructura.

La complejidad de la evaluación del riesgo aumenta al tiempo que se involucran, además de los parámetros antes anotados, actores de carácter, social, económico y político.

De acuerdo con Pigeon (2012) los conceptos de riesgos, desastre y vulnerabilidad convolucionan en sistemas complejos en los que se interrelacionan sistemas terrestres y humanos. Por su mismo carácter complejo, estos sistemas difícilmente son analizables y, menos aún, predecibles. Figura 4.1.

Complejidad: Intensificación de la interacción entre sistemas.



Complejidad: Desafíos, riesgos y cuestionamientos a la relevancia absoluta de las acciones políticas (claramente limitadas por una amplia gama de efectos poco predecibles)

Figura 4.1 Complejidad en la gestación de riesgos por fenómenos naturales.
Tomado de: Pigeon (2012).

Así mismo, en relación al concepto de vulnerabilidad, el cuál es intrínseco al de riesgo; como lo señala Rivera (2012), en términos generales pueden distinguirse dos tipos: la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social. La primera es más factible de cuantificarse, mientras que la segunda puede valorarse cualitativamente y es relativa, ya que está relacionada con aspectos económicos, educativos y culturales, así como el grado de preparación de las personas.

En este trabajo, no se aborda el aspecto de vulnerabilidad y, por ende de riesgo, social en un sentido estricto. Considerando que en una zona urbana la mayoría de las actividades humanas se llevan a cabo dentro de edificaciones, sean estas de tipo habitacional, comercial, de servicios, de trabajo, etc.; se asume que en la población urbana su grado de exposición, susceptibilidad y capacidad de respuesta ante un fenómeno sísmico está determinado, en primera línea, en gran medida por la vulnerabilidad física de las edificaciones en las que realiza sus actividades. En el mismo sentido de ideas, el daño que las edificaciones puedan sufrir determinará en mucho el grado de pérdidas, tanto humanas como económicas que sufrirá la ciudad.

Considerado lo anterior; se plantea un marco teórico desde un enfoque de sismicidad e ingeniería sísmica,

evaluando los cuatro elementos implicados en la ecuación de riesgo: peligro, exposición, susceptibilidad y capacidad de reacción del sistema expuesto, esto es de las edificaciones.

De acuerdo con Ordaz (2011), el peligro sísmico se refiere a la medida de frecuencia de sismos de cierta intensidad, en tanto que riesgo sísmico implica medidas de los daños que, con cierta frecuencia, podrán presentarse en una estructura. Para estimar el riesgo sísmico que enfrenta una estructura en un sitio se requiere saber varias cosas: 1) dónde ocurren los temblores potencialmente dañinos; 2) qué tan frecuentemente; 3) cuál es la distribución de los tamaños de esos temblores (cuántos de magnitud mayor que 7, cuantos de magnitud mayor que 8, etc.); 4) qué intensidades se producen en el sitio en cuestión, si ocurre un temblor con magnitud y posición conocidas; y 5) que daños producirá en estructuras con diseño conocido.

De los cinco puntos que plantea Ordaz (2011), podemos decir que los cuatro primeros determinan el peligro sísmico, mientras que el quinto lo determina el grado de exposición, susceptibilidad y capacidad de reacción del sistema.

De manera sucinta, Santoyo (2005) resume con bastante claridad las fuentes de sismicidad en el Valle de México; esta sismicidad está determinada por varias fuentes, Figura 4.2:

Temblores locales. Se originan dentro de la cuenca o en sus inmediaciones. En el siglo XX se registraron sismos no destructivos de este tipo con magnitudes intermedias o bajas pero posiblemente en el pasado hayan ocurrido otros más grandes. En años recientes han ocurrido varios sismos pequeños en las lomas del poniente de la ciudad de México.

Temblores originados en la placa Norteamericana. El gran temblor de 1912, originado en el graben¹ de Acambay a unos 70 km al noroeste de la capital es uno de estos. Este graben sigue amenazando a la ciudad aunque se ha estimado que el periodo de retorno de los microsismos que origina es del orden de un milenio.

Temblores de subducción de la placa de Cocos bajo la Norteamericana. Son los que mayores estragos han causado en la capital. Los temblores de Guerrero de 1909, 1957 y 1979 se originaron ahí, así como los de Michoacán de 1911 y los tristemente célebres de septiembre de 1985. Cerca de la placa de Rivera tuvieron lugar los temblores de Colima de 1932 y 2002 así como el de manzanillo de 1995. El temblor de Manzanillo de 1932 es el de mayor magnitud que se haya registrado en nuestro país $M = 8.5$.

Temblores de la placa de Cocos. Se originan a profundidades intermedias, entre 50 y 100 km con magnitudes que disminuyen conforme se alejan del litoral. Han alcanzado magnitudes en la escala Richter de 8.0 cerca de la costa y alrededor de 6.5 bajo la cuenca de México. Estos temblores ocurren por fallamiento normal en la placa de Cocos subducida bajo la placa continental. Los temblores del Golfo de México así como los de Jáltipan de 1957 y de Orizaba (o Cd. Serdán) de 1973, y más recientemente el de Tehuacán 1999 tienen este origen.

¹ Graben o fosa tectónica es una larga depresión limitada en ambos lados por fallas paralelas levantadas entre las cuáles el terreno se ha hundido por efecto de fuerzas internas.

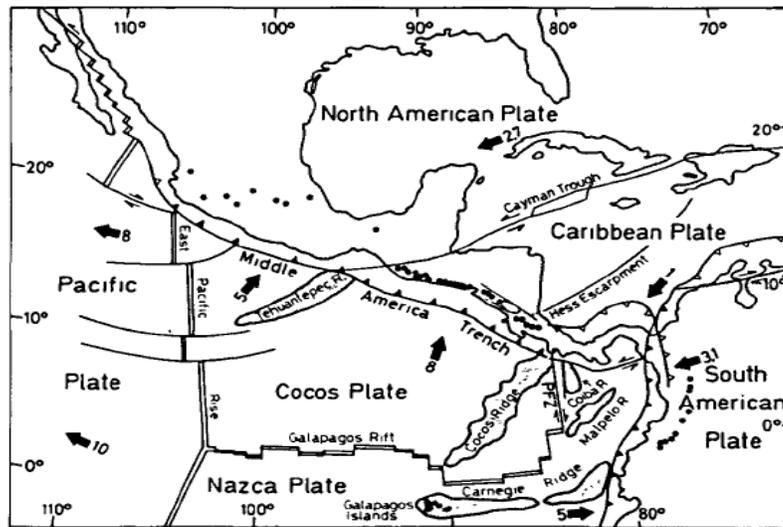


Figura 4.2 Sismo tectónica de la República Mexicana (Hartmut, 1991).

Una vez definida la o las fuentes sísmicas que pueden afectar un sitio; esto, a *grosso modo*, se resume en lo que se conoce como magnitud de los sismos y se expresa en grados sísmicos (ej. un sismo $M=8$, se refiere a un sismo de 8 grados de magnitud); es necesario considerar dos aspectos importantes para poder definir el peligro sísmico. El primero, como lo anota Ordaz (2011), una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos, que en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber, qué intensidad se presentaría en el sitio en cuestión, si en una fuente ocurriera un temblor con magnitud dada. A las relaciones entre magnitud, posición relativa, fuente-sitio e intensidad, se les conoce como *leyes de atenuación*. Usualmente, la posición relativa fuente-sitio se especifica mediante la distancia focal, es decir, la distancia. El concepto intensidad, se usa en sentido generalizado, es decir, como una medida razonable y con significado ingenieril del tamaño del temblor en el sitio de interés. Son medidas de intensidad comúnmente usadas la aceleración máxima del suelo, la velocidad máxima del suelo y las ordenadas del espectro de respuesta para 5% del amortiguamiento crítico.

Para la fuente sísmica localizada en la costa del Pacífico que, como antes se anotó es la que más estragos ha ocasionado en la ciudad de México, Ordaz (2011) anota la siguiente relación de atenuación:

$$E(\log A_{\max}) = 1.76 + 0.3M - \log R - 0.0031R$$

En donde: A_{\max} es la aceleración máxima y se expresa en cm/seg^2 ; $E()$ denota valor esperado, M es la magnitud del sismo y R es la mínima distancia al área de falla, en km. La desviación estándar del logaritmo común de A_{\max} resulta ser de 0.25.

Como lo observa Ordaz (2011), una vez aplicada la regla de atenuación a un sismo de magnitud M , es posible conocer, con cierto grado de precisión, la intensidad sísmica en el sitio de interés en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento del terreno; si bien existen otros parámetros importantes a considerar tales como las frecuencias y duración del sismo en el sitio de interés.

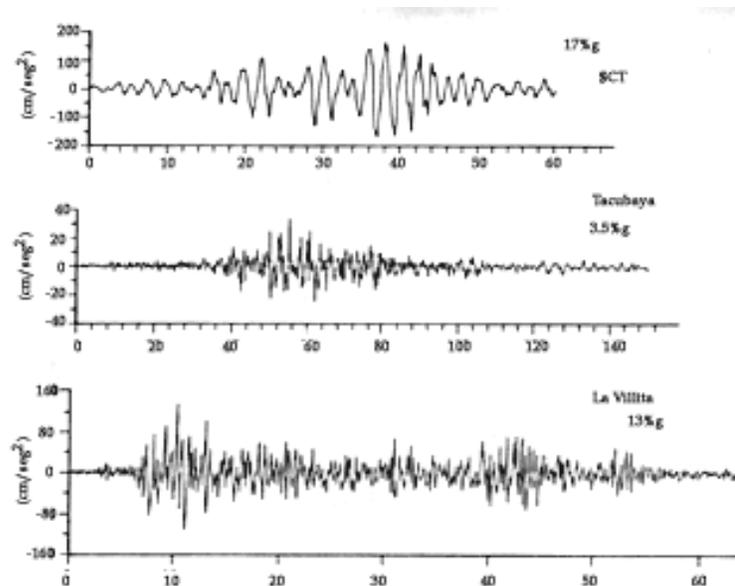
Con la intensidad sísmica conocida en el sitio de interés, es posible considerar que se ha definido ya el peligro sísmico.

La exposición

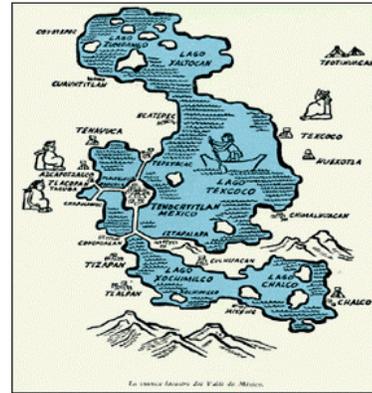
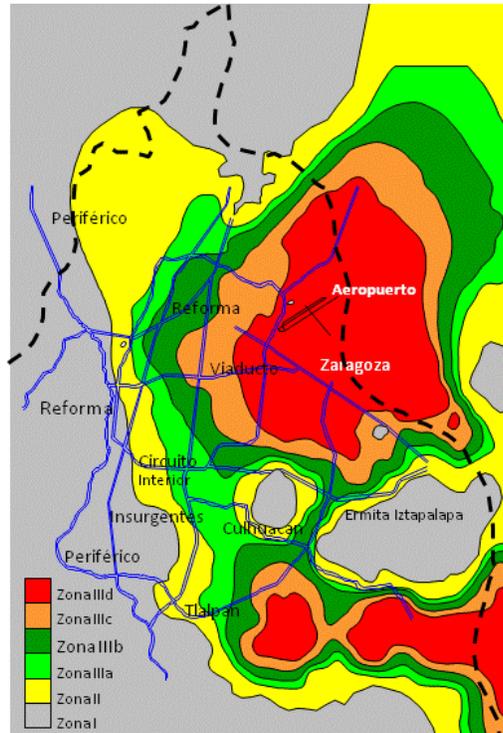
En el concepto de exposición toma relevancia el término *efectos de sitio*, el cual se refiere a las características geotécnicas del terreno en el sitio de interés. En esta etapa es importante considerar que la zona que se quiere evaluar puede, y generalmente así sucede, tener una gran heterogeneidad en las características geológicas de su subsuelo, lo que se manifiesta en efectos diferentes en toda el área de interés para un mismo sismo. En este sentido es importante observar que, mientras en la sismicidad y las reglas de atenuación la acción humana es irrelevante, en los efectos de sitio las obras humanas pueden ser de suma trascendencia por la modificación de las características que puedan inducir. En el caso de la ciudad de México, la modificación del uso del suelo respecto al ambiente lacustre original es un dramático ejemplo de esto.

Como lo señala Santoyo (2005), para el caso de la ciudad de México, los sismos que se originan en cada una de las fuentes sísmicas son diferentes y sus efectos se manifiestan de manera diferente en las zonas de lomas, transición y lacustres de la ciudad (Figura 4.3). Los temblores de subducción son ricos en frecuencias bajas (periodos largos) mientras que otros, tales como los generados por fallas, volcanes o colapsos de cavernas, concentran su energía en frecuencias más altas (periodos cortos). Esto explica porqué los temblores de subducción son los que más afectan a la zona de arcillas lacustres. Por otro lado,

si se presentara otro en la falla de Acambay, por ejemplo, las zonas de terrenos duros o las de transición podrían ser las más dañadas. Es bien sabido que hay una relación entre la intensidad sísmica en un sitio, las condiciones del subsuelo, la magnitud, la distancia focal y la naturaleza de las fuentes sísmicas. Todos estos aspectos han sido objeto de investigaciones cuya importancia volvió a evidenciarse después de 1985. Algunas implicaciones prácticas de estas pesquisas se han reflejado en las Normas Técnicas Complementarias para el diseño Sísmico de Edificios. En particular, la zonificación sísmica del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal ejemplifica cómo algunas investigaciones geotécnicas llevadas a cabo desde 1986 han incidido en la práctica de la ingeniería sísmica de nuestra ciudad. Los espectros de diseño para cada una de estas zonas toman en cuenta todas las fuentes sísmicas que contribuyen al peligro sísmico y, así mismo, las condiciones geotécnicas particulares de cada una de ellas, (Figuras 4.4 y 4.5). Sin duda, el factor que más influye en la intensidad sísmica local es el subsuelo. De ahí que los estudios sobre las características y propiedades dinámicas de las arcillas del valle de México sean tan importantes.



**Figura 4.3 Sismogramas del temblor del 19 de septiembre de 1985 detectados con sismógrafos localizados en diversos puntos de la ciudad de México.
Tomado de: Santoyo (2005)**



Zona I, firme o de lomas: localizada en las partes más altas de la cuenca del valle, está formada por suelos de alta resistencia y poco compresibles. La amplificación de las ondas sísmicas es reducida y los movimientos son de corta duración.

Zona II o de transición: presenta características intermedias entre la Zona I y III.

Zona III o de Lago (A, B, C, D): localizada en las regiones donde antiguamente se encontraban lagos (Lago de Texcoco, Lago de Xochimilco). El tipo de suelo consiste en depósitos lacustres muy blandos y compresibles con altos contenidos de agua, lo que favorece la amplificación de las ondas sísmicas.

Límite de Responsabilidad: El presente mapa de zonificación sísmica del D.F. es de carácter exclusivamente ilustrativo y no podrá ser utilizado bajo ninguna circunstancia para otro fin.

Figura 4.4 Zonificación sísmica del Distrito Federal (NTC-sismo (2004))

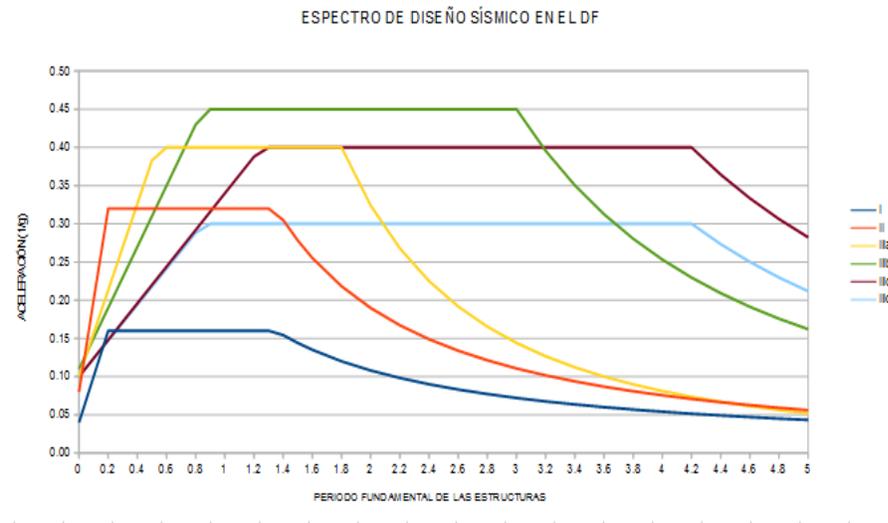


Figura 4.5 Espectros de diseño por sismo por zona sísmica del Distrito Federal.

Resulta importante indicar que las zonas sísmicas y sus respectivos espectros de diseño², son sólo el escenario para diseño sísmico de edificaciones indicado en la normativa aplicable vigente en el Distrito Federal. Este escenario es cambiante día a día, tanto por las características propias de cada sismo que se genere como por las modificaciones que se dan en las condiciones locales del subsuelo de la ciudad. En este sentido, la construcción de nuevas obras, el abatimiento de los mantos freáticos, los hundimientos, tanto regionales como locales necesariamente modifican las características dinámicas del subsuelo generando nuevos escenarios de exposición. Un buen ejemplo de esto lo muestra (Morquecho, 2003), Figura 4.6, al comparar las aceleraciones registradas en algunos puntos del Distrito Federal del sismo del 21 de enero de 2003 en las costas de Colima (M = 7.6) con las del sismo del 19 de septiembre de 1985 en las costas de Michoacán (M = 8.1). En la Figura 4.6 se observa que algunos puntos se registraron mayores aceleraciones durante el sismo de 2003 en comparación con las registradas en el de 1985.

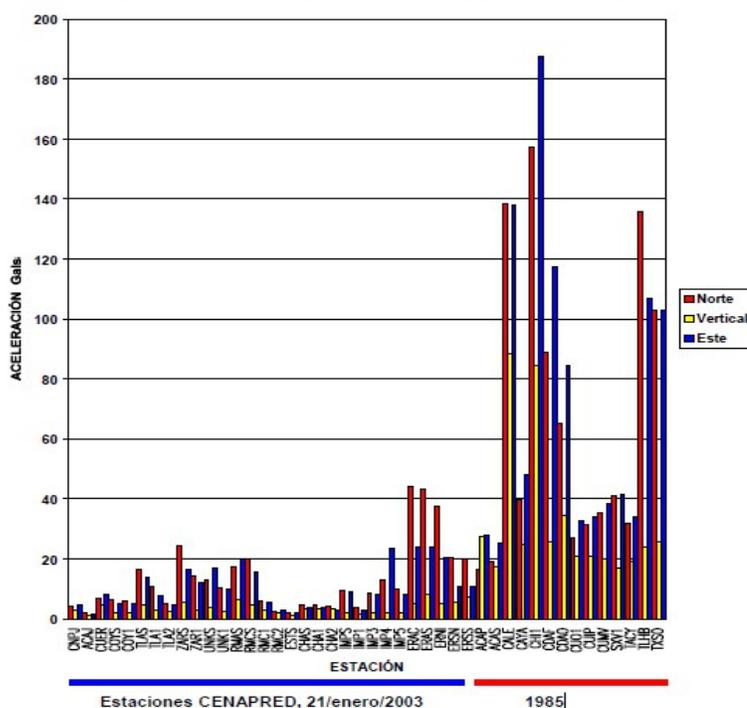


Figura 4.6 Comparación de aceleraciones del sismo de 1985 contra aceleraciones de la red de observación sísmica del CENAPRED, registradas en el sismo del 21 de enero de 2003. Tomado de: Morquecho (2003)

² Un espectro de diseño es una envolvente de espectros de sitio suavizada (sin variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos típicos en una zona. Se obtienen generalmente mediante procedimientos estadísticos.

La susceptibilidad y la capacidad de reacción de las edificaciones

La susceptibilidad y la capacidad de reacción de las edificaciones, a diferencia del peligro sísmico y en buena parte de la exposición, son competencia humana totalmente; esto es que están determinados, por un lado, por la capacidad y grado de conocimiento para entender los fenómenos sísmicos naturales y, por otro, de su capacidad técnica y grado de desarrollo en materiales y sistemas constructivos que le lleven a diseñar y construir estructuras más seguras ante solicitaciones sísmicas.

Al respecto, Rivera (2005) anota algunas variables a considerar para la evaluación sísmica de puentes; si bien estas pueden hacerse extensivas, con sus respectivas reservas, a edificaciones. Entre estas variables resaltan las siguientes:

- Tipología. Es el tipo característico de la edificación, muy influido por su geometría. En una zona urbana se distinguen mayoritariamente dos tipos, casas y edificios; si bien existen otros tipos tales como bodegas, centros comerciales, etc.
- Sistema estructural. Se refiere al sistema que da soporte y resistencia a la construcción ante solicitaciones sísmicas
- Resistencia de materiales. Es la clase de material y su capacidad de soportar cargas y deformaciones.
- Normativa de construcción. Indica, entre otras cosas, la filosofía de diseño, los límites de desplazamiento permitidos, los detalles de reforzamiento exigidos, y los coeficientes sísmicos con que se diseñó y construyó.
- Año de construcción. Es un buen indicio para inferir el estado de conservación que la pudiese tener la construcción.

Se observa que la mayoría de las variables indicadas se recopilan en los reglamentos de construcción aplicables en cada época, lo que permite clasificar en “generaciones”, desde un punto de vista estructural, a las construcciones existentes en la zona de interés; en base al reglamento de construcción vigente en el año en que fue construido. A su vez estos reglamentos son, sin duda, decididamente influenciados por demandas sociales.

Como ya se ha anotado, se ha definido un marco conceptual del riesgo sísmico desde un enfoque estrictamente técnico; no obstante, tal como lo infiere Pigeon (2011) el riesgo sísmico es un complejo sistema en que convolucionan sistemas terrestres y humanos. En verdad, como se ha anotado los sistemas humanos, en alguna de sus formas, interactúan con los sistemas terrestres; si bien su influencia en la dinámica sísmica terrestre es prácticamente nula, en la modificación de los sitios en donde se asientan las comunidades humanas, su influencia es medular en la génesis de su propia vulnerabilidad y riesgo sísmico.

La dinámica humana en el espacio que habita, modifica día a día las condiciones que preparan un nuevo escenario de exposición, susceptibilidad y capacidad de reacción ante un evento generado por el peligro sísmico. En este nuevo escenario serán actores las nuevas y existentes construcciones que este grupo humano haya hecho, y el daño físico que estas construcciones puedan sufrir afectará su vida, patrimonio y convivencia; esto es su propia naturaleza social.

4.2 Metodología para tratamiento de datos e información

Los datos geoespaciales, como se anotó en el capítulo 3, suelen presentarse en dos formatos; el vectorial y el raster. Cada uno de ellos, por sus propias características, requiere un tratamiento propio para obtener el mayor provecho. Para este trabajo, se dispone de tres conjuntos de datos:

1. Dos grupos de datos vectoriales en formato shape (.shp), del catastro de la delegación Benito Juárez del año 2000. El primero de ellos conteniendo las áreas construidas mediante polígonos con los siguientes atributos relevantes para este trabajo: NFLOORS (número de niveles), HEIGHT (altura en metros considerando que cada nivel tiene una altura de 3.5 metros); y el segundo conteniendo los predios, también como polígonos con los siguientes atributos relevantes para este trabajo: LUkey (una clave en la que se incluye un número de dos dígitos, este número se asume que es el año de registro en el catastro de la parcela, y que para fines de este trabajo se consideró el año de construcción del área construida contenida en cada parcela).
2. Dos grupos de datos en formatos raster, contenidos en imágenes de satélite Quickbird del área de la delegación Benito Juárez. El primero una imagen multispectral de cuatro bandas (red, green, blue, NR) con resolución espacial de 2.44 m de diciembre de 2008; el segundo, una imagen pancromática con resolución espacial de 0.61 m de diciembre de 2008.
3. Dos grupos de datos en formato raster, contenidos en un modelo digital de elevación de la delegación Benito Juárez de 2008 con dos bandas. La primera banda con valores de altimetría en metros sobre el nivel del mar en un rango de 2215 a 2412 nmsm y con un tamaño de pixel de 1 m. La segunda banda con valores de intensidad de pulso en un rango de número digital de 0 a 255. Estos dos grupos de datos han sido obtenidos con tecnología LIDAR. Estos datos se derivaron de un levantamiento efectuado para el Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Como puede observarse de los datos disponibles se precisan algunas consideraciones previas:

- a) La diferencia de fechas de adquisición es un período de una década entre los registros de catastro (2000) y el DEM LIDAR (2008); lo que, por un lado, permite obtener una actualización de áreas construidas entre los años 2000 y 2008, pero por otro lado, no es posible conocer el año preciso de construcción (entre 2000 y 2008) en que se edificó la nueva construcción.
- b) No es posible obtener directamente información sobre materiales de construcción, sistemas estructurales o estado de conservación de las edificaciones.

Considerando lo anterior, se hace la siguiente propuesta metodológica del tratamiento de datos disponibles, utilizando el software Arcgis 10.0 y ENVI 4.8:

De los datos vectoriales.

v.1 Los datos del shape de áreas construidas se depura eliminando los atributos que no son relevantes para fines de este trabajo; de esta manera, sólo se mantienen en la base de datos del shape los atributos, número de niveles (Nfloors) y altura (Height).

v.2 Se calculan las áreas de los polígonos utilizando el “fiel calculator” de Arcgis.

v.3 Se eliminan todos los polígonos con altura igual a cero así como aquellos con un área menor a cinco metros cuadrados y con un número de pisos menor a dos, por considerar que estos polígonos no representan estructuras en realidad, sino construcciones más simples, tales como cubiertas ligeras o cobertizos.

v.4 Se sobrepone el shape de áreas construidas al shape de parcelas; se observa que, en la mayoría de los casos, existe más de un polígono dentro de un predio; por lo que se hace una unión de los polígonos dentro de cada predio utilizando la herramienta “merge” de Arcgis., de modo que puedan formar una sólo estructura. Esta labor se hace manualmente para cada parcela del área de estudio atendiendo criterios de prácticas típicas en construcción así como de las observaciones, del tipo de estructuras, sus formas y estilos, que se hicieron durante los recorridos realizados en dicha zona.

v.5 Se determina el año de construcción de cada estructura obtenida en el paso anterior; para esto se considera el atributo LUkey del shape parcelas, de acuerdo a la consideración que se ha indicado anteriormente. Tanto los pasos v.4 como v.5 se realizan haciendo una edición de la base de datos del shape utilizando Arcgis.

v.6 Una vez que la base de datos contiene sólo los polígonos que se consideran estructuras reales, se determinan las propiedades geométricas (el área y el perímetro de cada una de estas estructuras) utilizando el “field calculator” de Arcgis, con ellos se determina un IC (índice de compacidad, $IC = \sqrt{(\text{área})/\text{perímetro}}$). Este IC se utilizará como factor de castigo para considerar la irregularidad en base de la estructura en el análisis de vulnerabilidad.

v.7 Con la información de altura y número de niveles de cada construcción, y considerando las características constructivas observadas en la zona, se establece una primera clasificación topológica de las estructuras en viviendas y edificios. En esta clasificación se considera que las construcciones de hasta cinco niveles son casas, con un sistema estructural a base de muros de mampostería de tabique de arcilla recocido; y de más de cinco niveles son edificios con sistema estructural a base marcos rígidos³ de concreto reforzado.

v.8 Se determina el periodo fundamental de vibración de cada estructura en función del número de niveles con la relación planteada $T=0.1N$; en donde T es el periodo fundamental de vibración en segundos y N el número de niveles, (Kwon y Kim, 2010).

v.9 Para plantear el escenario sísmico para el cual se determinará la vulnerabilidad de las estructuras, se digitalizó el mapa de zonificación sísmica del Distrito Federal, NTC-sismo (2004), y utilizando la herramienta “selection by location” de Arcgis, se determinó la zona sísmica en la que se ubica cada estructura de la zona de estudio; conocido esto, es posible incluir la función del espectro de diseño para cada estructura en la base de datos del shape de áreas construidas en función al periodo fundamental de vibración de cada una. Con esto se determina la demanda sísmica (S_a) en cada estructura utilizando los espectros de diseño de las zonas sísmicas en las que esta dividida la ciudad; esta demanda sísmica se refiere a cuanta energía sísmica se verá sometida la estructura dependiendo de su localización geográfica.

v.10 Determinado lo anterior se calcula el Índice de Daño Físico (Idf), de acuerdo a la función de vulnerabilidad aplicable. Las funciones de vulnerabilidad utilizadas en este trabajo se explican en la sección siguiente.

Con los pasos anteriores se obtiene una primera estimación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones que se asientan en la zona de estudio de acuerdo a los datos del catastro del año 2000.

³ El marco rígido es un sistema estructural en el que los elementos estructurales (vigas y columnas) están sujetos rigidamente, es decir cuando las juntas son capaces de transferir flexión entre los miembros, el sistema asume un carácter particular. Si todas las juntas son rígidas, es imposible cargar algunos de los miembros transversalmente sin provocar la flexión de los demás.

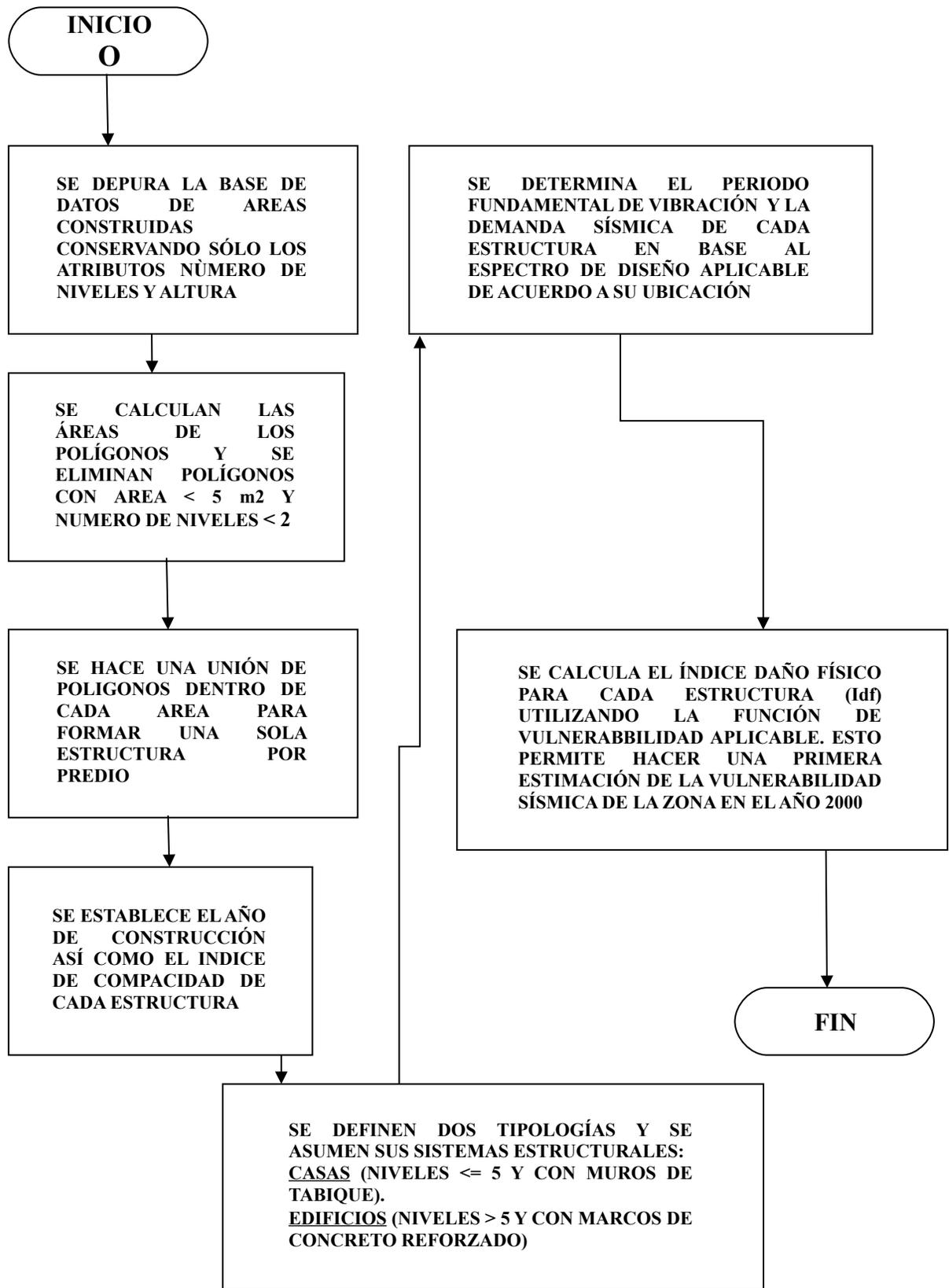


Figura 4.7 Diagrama de flujo del tratamiento de datos en formato vector

De los datos raster.

r.1 Se realizó una fusión de las imágenes Quickbird utilizando en algoritmo ATROUS, con lo que se obtuvo una imagen multispectral de 0.6 m de resolución espacial.

r.2 Sobre la imagen fusionada se determinó el índice normalizado de vegetación, NDVI, utilizando el procesador de imágenes de Arcgis.

r.3 A partir del DEM LIDAR se obtuvo un modelo digital de superficie (MDS); de la resta raster DEM-MDS se obtuvieron las alturas en metros en cada pixel de la zona de estudio, esto es un modelo digital de alturas (MDA). Estos cálculos se obtuvieron mediante herramientas y metodologías desarrolladas por Silván et al (2014).

r.4 El NDVI se utilizó como máscara sobre el MDA para excluir las zonas arboladas y, de esta manera, obtener sólo las alturas de las áreas construidas.

r.5 Al sobreponer el MDA sobre el shape de áreas construidas es posible distinguir los cambios ocurridos en las construcciones de la zona de estudio entre la fecha del shape catastral (2000) y la fecha del levantamiento LIDAR (2008).

r.6 Se editó el shape de áreas construidas del catastro y se reacomodaron los vértices para actualizar la base a los nuevos edificios, en algunos casos se generaron nuevos polígonos. En este proceso se observó que algunas parcelas se fusionaron para la construcción de nuevos edificios. De este proceso se generaron tres nuevos archivos en formato vectorial los cuales se nombraron 1) Edificios permanentes, en él se incluyeron aquellas construcciones en las que no observaron cambios en planta ni en altura; 2) Edificios actualizados, aquello en los no se observaron cambios en el trazo de la planta pero si en la altura; y, 3) Edificios nuevos, aquellos que cambiaron en planta.

r.7 Sobre los nuevos shapes generados se aplicó un análisis “zonal statistics” con Arcgis utilizando el MDA generado en r.4.; de este análisis se obtuvo un nuevo vector que contiene la altura LIDAR en cada edificio. Es importante anotar que se usó la MEDIA en este análisis.

r.8 Utilizando ArcScene se generó una extrusión del shape generado en r.8. Al sobreponer este shape con el de áreas construidas del catastro es posible observar en 3D los cambios se generaron en la configuración de la zona.

r.9 Al shape generado en r.8 se aplicaron los pasos v.8 a v.10 para obtener el índice de daño físico sobre las construcciones actualizadas con datos LIDAR.

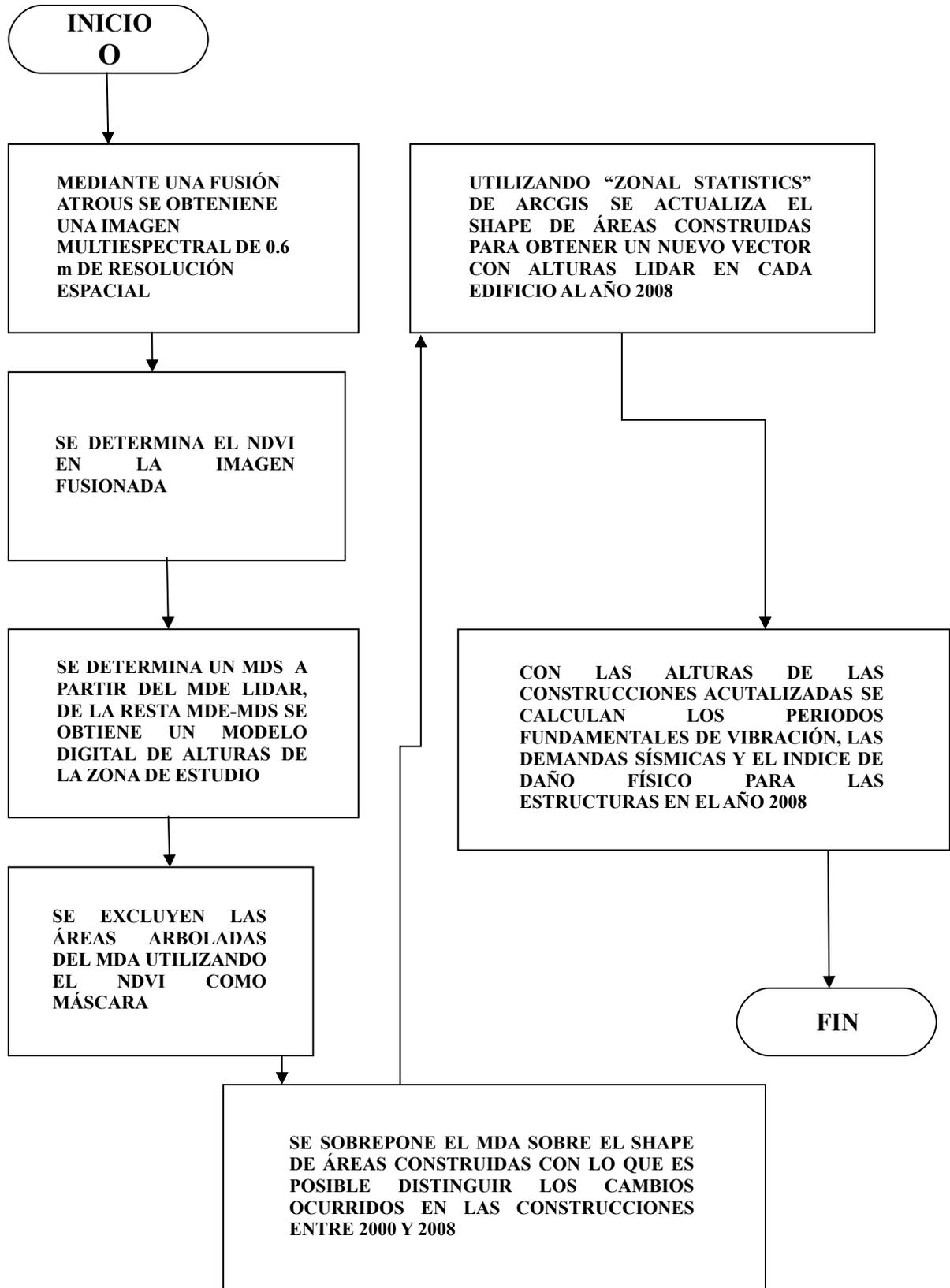


Figura 4.8 Diagrama de flujo del tratamiento de los datos en formato raster

4.3 Funciones de vulnerabilidad utilizadas

Como se anotó en el capítulo 2, las metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica de construcciones, pueden clasificarse en dos grandes grupos, analíticas y empíricas. En este trabajo se eligió una metodología analítica planteada en el trabajo de (Rivera, 2013), la cual utiliza funciones de vulnerabilidad que correlacionan el grado de daño físico con la intensidad sísmica.

Esta metodología se consideró apropiada para la zona de estudio por las siguientes razones:

- Utiliza funciones de vulnerabilidad aplicables para los dos tipos de estructuras que mayoritariamente se observaron en la zona de estudio mediante recorridos de campo: viviendas a base de muros de mampostería y edificios a base marcos de concreto reforzado.
- Las funciones de vulnerabilidad fueron desarrolladas por investigadores nacionales, de acuerdo a la normativa nacional; lo que, intrínsecamente, asegura un buen conocimiento de la práctica común en construcción de estructuras en el país.
- Las funciones utilizadas son sencillas de aplicar, ya que utilizan como parámetro principal el periodo dominante de vibración de la estructura (T), con el cual resulta fácil estimar una aceleración demandada utilizando los espectros de diseño definidos en la normativa aplicable; por lo que, en caso de que se modifique el escenario sísmico para el cual se realiza la evaluación de vulnerabilidad, la actualización de esta evaluación se puede hacer rápidamente.
- Define un rango de daño físico entre cero y uno lo que permite expresar el daño esperado de una escala cuantitativa y una cualitativa desde daño nulo hasta daño completo, además de poder clasificar la vulnerabilidad en grados desde muy baja hasta muy alta.

Funciones de vulnerabilidad para edificios.

Para el caso de edificios estructurados a base de marcos de concreto reforzado, en el trabajo de Díaz (2004) se desarrollaron funciones de vulnerabilidad. En el estudio antes referido se estudiaron marcos de 5, 10 y 15 pisos. Estos marcos pertenecen a sistemas estructurales tridimensionales los cuales tienen una planta cuadrada y son regulares en elevación. Se supuso que se tiene el mismo número de marcos en las

dos direcciones ortogonales y que estos marcos tienen las mismas características geométricas (dimensiones de traveses y columnas). Dichos sistemas se diseñaron conforme al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal RCDF (1993) y sus normas técnicas complementarias NTC-sismo (1995); NTC-concreto, 1996). Los sistemas están destinados para oficinas (Grupo B). Que los marcos están desplantados en la zona de terreno compresible en el sitio SCT (Zona III). Además, se consideró un factor de comportamiento sísmico (Q)⁴ de cuatro. En su análisis y diseño no se tomaron en cuenta los efectos de torsión y la interacción suelo-estructura, Rivera (2013).

De acuerdo con Díaz (2004), la función de vulnerabilidad, en términos de las consecuencias económicas, puede ser expresada en la siguiente forma:

$$\delta_E(y) = \delta_E(y|S)(1-p_F(y)) + \delta_{EF}p_F(y) \quad (4.1)$$

donde, $\delta_E(y)$ es el valor esperado del costo de los daños causados por un temblor de intensidad igual a y , $\delta_E(y|S)$ es el valor esperado de dicho costo, condicionado a que el sistema sobreviva a la intensidad citada, δ_{EF} es el costo del colapso y $p_F(y)$ la probabilidad de que ocurra el colapso, (Rivera, 2013).

Para la evaluación de la ecuación 4.1, se hace una estimación del daño físico. El daño físico en el i -ésimo segmento, ante la acción de un temblor con intensidad igual a y , puede estimarse como:

$$\delta_i(y) = g[\psi_{(y)}/\psi_{ci}] \quad (4.2)$$

donde, $\delta_i(y)$ es el valor esperado del índice de daño físico en el segmento i ante la intensidad y considerada, $\psi_{(y)}$ es la distorsión angular máxima del i -ésimo segmento con la respuesta sísmica del sistema y ψ_{ci} es la capacidad de deformación del mismo segmento, expresada también como distorsión angular. Siendo g la aceleración de la gravedad.

⁴ El factor de comportamiento sísmico Q se refiere al grado de ductilidad ante una acción sísmica que una construcción estructura puede tener, en base a su geometría, materiales y estructuración.

No obstante $\delta_i(y)$ se puede calcular mediante una expresión de la forma Esteva (2002).

$$\delta(y) = 1 - e^{-ay^m} \quad (4.3)$$

donde, a y m son parámetros que dependen del tipo de arreglo estructural, de los materiales y de los detalles constructivos que determinan la capacidad de deformación. Con base en esta ecuación se puede adoptar una expresión como la siguiente:

$$\delta(y) = 1 - e^{-ay^m} \quad (4.4)$$

$$u = \psi(y)/\psi_{ci} \quad (4.5)$$

Considerando la relación entre la distorsión de entrepiso y el daño físico en la ecuación 4.4, en el trabajo de Díaz (2004) se calcularon los valores de los parámetros a y m para el caso del marco con la consideración de muros divisorios. Tomando que la distorsión de inicio del daño corresponde a un daño físico de 0.01 y la capacidad de distorsión a un daño físico de 0.99, se ajustó una expresión para el valor esperado del daño físico de la forma:

$$\delta(y) = 1 - e^{-ay^m} \quad (4.6)$$

Por lo que los valores de a y m correspondientes al daño físico global de edificios de 5, 10 y 15 pisos se muestran en la tabla 4.1; los valores correspondientes al daño físico por entrepiso se pueden consultar en el trabajo de Díaz (2004). Cabe comentar que en la ecuación anterior el valor de y se maneja como una fracción de la gravedad, Rivera (2013).

Número de pisos	a	m
5	36.2	4.07
10	50.5	3.6
15	18	2.31

Tabla 4.1 Parámetros de las funciones de daño físico global para edificios de varios pisos.

Tomado de: Díaz (2004)

Para estimar la demanda sísmica en los edificios, en términos de la fracción de la aceleración (y), se requiere conocer el periodo natural de vibración del edificio (T), para con ello entrar a un espectro de respuesta, por lo consiguiente se puede hacer uso de alguna de las ecuaciones simplificadas que recomiendan Kwon y Kim (2010) para marcos de concreto reforzado, Rivera (2013).

$$T = 0.1N \quad (4.7)$$

ó

$$T = 0.046h_n^{0.9} \quad (4.8)$$

donde, N y h_n son el número de pisos y la altura del edificio (en metros), respectivamente.

Funciones de vulnerabilidad para vivienda

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica de viviendas es posible tomar como referencia el trabajo de Flores (2006), en donde se propone un catálogo de funciones de vulnerabilidad para este tipo de construcción teniendo como base la siguiente ecuación, (Rivera, 2013):

$$I(Sa) = 1 - e^{-a(Sa/Sa_{max})^m} \quad (4.9)$$

donde, $I(Sa)$ es el índice de daño físico en función de la aceleración espectral Sa , Sa_{max} es la aceleración máxima que puede resistir la vivienda atendiendo a sus características de estructuración, a y m son constantes que dependen de las características de la construcción y de las propiedades mecánicas de los materiales.

En la tabla 4.2 se consignan algunos valores de a , m y Sa_{max} que son parámetros para construir la función de vulnerabilidad conforme a la ecuación 4.9, así mismo se proporciona el periodo de vibración de la vivienda (T_0) para efecto de evaluar la demanda sísmica con el uso de un espectro de respuesta, el cual se refiere a un sismo en particular, o de diseño. Estos parámetros corresponden a una combinación de las posibles características geométricas y mecánicas de las viviendas y que pueden incidir en la vulnerabilidad sísmica de la estructura, tales como: densidad de muros en las direcciones x y y (d_x y d_y), factor de área efectiva en las direcciones x y y (f_{aex} , f_{aey}), número de pisos (n), resistencia a cortante (Vm) y módulo de elasticidad de la mampostería (E), Rivera (2013).

d_x	d_y	f_{aex}	f_{aey}	V_m (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	n	Sa_{max}/g	m	a	T_0 (s)
0.03	0.03	0.6	0.6	3	18000	1	1.84	4.28	3.73	0.08
						2	1.15	4.39	3.75	0.12
						3	0.83	4.83	3.84	0.17
						4	0.64	5.51	3.97	0.22
						5	0.52	6.37	4.15	0.27

**Tabla 4.2 Parámetros para construir funciones de vulnerabilidad de algunos casos de viviendas.
Tomado de: Flores (2006)**

Las densidades de muros propuestas corresponden a casos donde no se ha tenido un diseño sísmico especial. La resistencia a cortante, V_m , representa casos de materiales económicos comunes, ya sea tabiques de arcilla artesanal o piezas huecas sin control de calidad y el módulo de elasticidad, E , está relacionado con los cambios de longitud que experimenta el material, cuando es sometido a esfuerzos de tensión o compresión Flores (2006).

De acuerdo al trabajo de Flores y Reyes (2004) el valor de T_0 de la tabla 4.2 se calcula con la expresión siguiente:

$$T_0 = (0.2n + 0.12) \sqrt{(wH/Ed_{AE})} \quad (4.10)$$

$$d_{AE} = \sum F_{AE} A_x / A_p \quad (4.11)$$

$$F_{AE} = (1.33(L/H)^2) \leq 1 \quad (4.12)$$

donde, w es la carga distribuida por unidad de área, H representa la altura del muro, d_{AE} es la densidad efectiva de muros, L se refiere a la longitud de muro, y A_x y A_p son las áreas de muros en una dirección (puede ser en x ó y) de planta, respectivamente.

Mientras que el factor de área efectiva, F_{AE} (tanto en la dirección x como en y), se evalúa con:

$$F_{AE} = d_{AE} / d \quad (13)$$

donde, d es la densidad de muros en alguna dirección de análisis (x ó y), Rivera (2013).

Capítulo 5. CASO DE ESTUDIO. DELEGACIÓN BENITO JUÁREZ, CIUDAD DE MÉXICO

5.1 Algunos aspectos humanos

Primeramente es importante mencionar que se usa el término *aspectos humanos* para englobar diversos eventos históricos, sociales, económicos, políticos y culturales que van modificando el espacio geográfico. En la perspectiva de este trabajo, estos *aspectos humanos* son análogos a lo que Pigeon (2012) llama sistemas humanos, y que su compleja interacción con los sistemas terrestres dan forma a los conceptos de vulnerabilidad y riesgos sísmicos.

Históricamente, la Delegación Política Benito Juárez se creó oficialmente el 29 de diciembre de 1970 como consecuencia de la división en cuatro nuevas delegaciones de lo que hasta entonces se conoció como el Departamento Central; Delegación Cuauhtémoc, Delegación Miguel Hidalgo, Delegación Venustiano Carranza y Delegación Benito Juárez, DBJ (2013).

Si bien la Delegación Benito Juárez es joven en términos formales, el proceso de urbanización de su territorio actual se llevó a cabo durante todo el siglo XX. A continuación se presenta una breve cronología de este proceso:

En 1903 la administración local se había vuelto compleja y se decidió reformar internamente la división territorial, así el 26 de marzo de 1903 se promulgo la Ley de organización Política Municipal del Distrito Federal que complementaba el Estatuto de Gobierno, en esta ley se dividió el territorio en las municipalidades de Guadalupe Hidalgo, Azcapotzalco, Tacuba, Tacubaya, Mixcoac, Cuajimalpa, San Ángel, Coyoacán, Tlalpan, Xochimilco, Milpa Alta e Iztapalapa, De Gortari (1998). Figura 5.1.



Figura 5.1 Distrito Federal en 1903. Tomado de: De Gortari (1998)

En 1924 se modificó la ley de 1903, agregando una nueva municipalidad que se creó dentro del Distrito Federal llamada municipalidad de General Anaya con lo que se llegaba a 14 municipios externos a la Ciudad de México, (De Gortari, 1998). Figura 5.2.



Figura 5.2 Distrito Federal en 1924. Tomado de: De Gortari (1998)

En 1928 se desaparece el régimen municipal en el Distrito federal con la modificación al Art 73, Fracción VI de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, dando paso a las Delegaciones, modificándose su número y territorios; es así como, por unos meses, el Distrito federal se integra por 15 municipios, aunque la municipalidad de México no tuvo ninguna actividad como tal y se preparó para convertirse en el Departamento Central. Figura 5.3.

En diciembre de 1928 se crea el Departamento del Distrito Federal ó DDF, se dividió el Distrito Federal en dos zonas conocidas popularmente como zona interior y zona exterior:

Zona interior, llamada oficialmente Departamento Central, y que comprendía los antiguos municipios de México, Tacuba, Tacubaya y Mixcoac, donde la de México correspondía a la propiamente llamada Ciudad de México.

Zona exterior, llamadas oficialmente Delegaciones Foráneas, compuesta por trece delegaciones que eran: Guadalupe Hidalgo, Azcapotzalco, Iztacalco, Coyoacán, General Anaya, San Ángel, La Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Tlalpan, Iztapalapa, Xochimilco, Milpa Alta y Tláhuac. En el caso del municipio de San Ángel se había creado la delegación Magdalena Contreras, Contreras (2001).

DISTRITO FEDERAL EN 1928



Figura 5.3 Distrito Federal en 1928. Tomado de: De Gortari (1998)

Tras el asesinato del Gral. Álvaro Obregón en el territorio de la entonces delegación San Ángel se propuso y cambió el nombre de la delegación por el de Villa Álvaro Obregón. Además se cambió el nombre a la delegación Guadalupe Hidalgo por Villa Gustavo Adolfo Madero, Contreras (2001), (Figura 5.4).



Figura 5.4 Distrito Federal en 1929. Tomado de: De Gortari (1998)

En 1941 se elimina la delegación General Anaya que pasó a formar parte de la zona interior. En el Art. 8 de la Ley orgánica del Distrito Federal el Departamento Central se hace llamar Ciudad de México, a su vez se divide en ocho zonas o delegaciones, mientras se conservan las doce delegaciones foráneas, Contreras (2001), (Figura 5.5).



Figura 5.5 Distrito Federal en 1941. Tomado de: De Gortari (1998)

Figura 5.7 Distrito Federal de 1970 a 1979. Tomado de: De Gortari (1998)

De las ilustraciones presentadas en la cronología anterior se observa información interesante para los fines de este trabajo sobre el proceso de urbanización de la delegación Benito Juárez (DBJ):

- Hacia 1941 se presentan ya desarrollos residenciales en el centro-norte y poniente de lo que hoy es DBJ, si bien aún no se cataloga como área urbana salvo algunos poblados como San Pedro de los Pinos.
- En el mismo mapa de 1941 se observan terrenos invadidos en las zonas centro y oriente de DBJ.
- En el mapa de 1960-1969 el norte y centro de DBJ ya se cataloga como área urbana y en el sur ya se presentan desarrollos residenciales.
- En el mapa de 1970-1979 ya se cataloga como área urbana todo el territorio de DBJ.

La información observada permite definir algunas consideraciones para ser analizadas y concatenadas con parámetros constructivos:

- Hasta 1941 se considera que las edificaciones en DBJ se construyeron sin seguir alguna reglamentación, ya que si bien el primer reglamento de construcciones para la ciudad de México data de 1920, hacia 1941 el territorio de DBJ no estaba catalogado como área urbana; además las edificaciones a este año debieron ser en su mayoría de tipo campirano y de auto construcción.
- Hasta 1950, se considera que las edificaciones urbanas del área DBJ fueron diseñadas de acuerdo al reglamento de construcciones publicado en julio de 1942. En esta década (1940-1950) se asume que el centro de la zona norte de DBJ es plenamente urbana, desde el punto de vista normativo para construcción de edificios. Un hito de esta época es el Centro Urbano Presidente Alemán, cuya construcción se inicio en 1948.
- Se considera que durante la década de los 50's el área urbana de la DBJ se expande en toda su zona norte. El reglamento de 1942 es modificado con regulaciones de emergencia en 1957, a raíz de un sismo con $M_s=7.5$ ocurrido el 28 de julio de ese año.
- Entre 1960-1969 dos tercios de DBJ, de norte a sur, son catalogadas ya como área urbana. El reglamento de 1957 es sustituido por el reglamento de 1966.
- Entre 1970 y 1979 la totalidad del territorio de DBJ se cataloga como área urbana. El reglamento de 1966 es reemplazado por el de 1976, este nuevo reglamento adopta una nueva filosofía de

diseño para el diseño de estructuras de concreto y mampostería.

- A partir de 1980, el territorio de DBJ es plenamente urbano. La normativa aplicable desde entonces para las edificaciones nuevas han sido las siguientes: el reglamento de 1976, las regulaciones de emergencia de 1985 (a raíz de los sismos ocurridos el 19 y 20 septiembre de ese año), el reglamento de 1987 y el reglamento de 2004.

Además de los eventos históricos, anotados anteriormente, resaltan los siguientes datos estadísticos de la Delegación Benito Juárez, (DBJ, 2013):

Altitud: 2242 msnm; Topografía: plana con ligeras ondulaciones; Tipo de terreno: Arcilloso de alta plasticidad y baja resistencia, con un espesor de 15 metros; Clima: Templado; Extensión territorial: 2,663 Ha; Área total de concreto hidráulico y concreto asfáltico (banquetas y calles): 1,506 Ha; Centros urbanos (unidades habitacionales): 3; Colonias: 56; Manzanas: 2,210; Porcentaje total del territorio del D.F. (148,986 Ha): 1.8%; Número de habitantes (al 2010): 360,478; Edad promedio de los habitantes: 33 años; Población flotante al día: 1.5 millones; Viviendas: 113,741 de las cuales 72,439 (63.7%) están en edificios de departamentos; Densidad poblacional: 138.9 habitantes por hectárea (el promedio en el D.F. es de 131.6); Escuelas establecidas: 567; Empresas y/o comercios; 12,923.

Un aspecto humano muy relevante de la Delegación Benito Juárez lo constituye el nivel socio-económico de sus habitantes, como se anota en CD (2009) en el año 2005, el PIB per cápita nacional era de 7, 310 dólares; mientras que en el Distrito Federal éste era equivalente a 15, 229 dólares anuales. La delegación Milpa Alta tiene el menor nivel de PIB per cápita, con 7, 689 dólares, pero se mantiene arriba del nivel nacional. Por otra parte se encuentra la delegación Benito Juárez que tiene el mayor nivel de PIB per cápita en la República Mexicana con 27, 824 dólares anuales. En la misma referencia se asienta lo siguiente:

“Al llevar a cabo el análisis de marginación al interior del DF, se observa que en 2005 todas las delegaciones tienen un nivel muy bajo en el índice de marginación. Destaca la delegación Benito Juárez al ser la de menor marginación a nivel nacional.”

“La delegación Benito Juárez es la que tiene el menor porcentaje de población sin primaria completa de 15 años o más; mientras que el 14.7 de la población de Milpa Alta presenta esta característica.”

“En las delegaciones Iztacalco, Benito Juárez, Miguel Hidalgo, Azcapotzalco y Coyoacán, el porcentaje de ocupantes en viviendas sin drenaje ni servicio sanitario es menor al 0.1 por ciento; muy por debajo de la media nacional que equivale al 5.3 por ciento.”

“Las delegaciones Benito Juárez, Coyoacán, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Azcapotzalco, Iztacalco, Venustiano Carranza, Gustavo A. Madero e Iztapalapa tienen un nulo porcentaje en localidades con menos de cinco mil habitantes, mientras que Milpa alta tiene un 17.9 por ciento de su población en dichas localidades.”

“En las delegaciones Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Coyoacán, menos del 3.0 por ciento de su población está clasificada dentro de pobreza alimentaria; mientras que en Tláhuac y Milpa Alta tienen un porcentaje de población en estas condiciones superior al 10.0 por ciento.”

“A pesar de que todas las delegaciones del Distrito Federal tienen un nivel de rezago social muy bajo en el contexto nacional, al interior de la entidad resulta que Tláhuac, Xochimilco y Milpa Alta tienen un mayor nivel de rezago, en contraste con la Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Coyoacán que presentan los menores niveles.”

“Las delegaciones Tláhuac, Xochimilco y Milpa Alta serán las que presenten mayores retos para su desarrollo, mientras que por otro lado la Benito Juárez, Coyoacán y Miguel Hidalgo serán las fortalezas de la entidad que darán las condiciones necesarias para el progreso del nivel de vida de la población.”

De lo anterior se observa que la delegación Benito Juárez puede considerarse como el municipio más rico del país (en términos de PIB per cápita) y con uno de los niveles de vida más altos, dado el perfil socioeconómico de sus habitantes; no obstante las características del subsuelo en donde se ubica presenta una gran heterogeneidad en cuanto a propiedades mecánicas, lo que se traduce en que dentro del territorio de la delegación se presenten cinco de las seis zonas sísmicas anotadas en el reglamento de construcción vigente, (Figura 5.8).

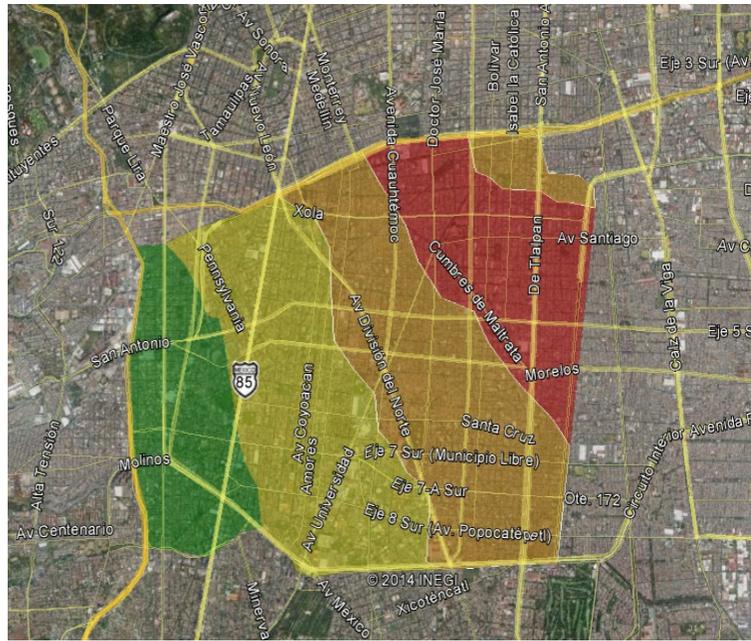


Figura 5.8 Zonas sísmicas en la delegación Benito Juárez. Zona I (verde), Zona II (amarillo), Zona IIIa (naranja), Zona IIIb (rojo), Zona IIIc (marrón)

Si bien, podría considerarse que la zonificación sísmica de la delegación no es un aspecto humano y que, por tanto, debe considerarse como parte del sistema terrestre, esto es ambiguo ya que los eventos humanos han modificado ininterrumpidamente el espacio de la delegación, incluyendo las características del subsuelo.

En este trabajo se estudia solamente la franja norte de la delegación Benito Juárez por ser esta zona la más antigua, y por tanto en donde puede encontrarse una mayor heterogeneidad de estructuras en cuanto a su edad y características de diseño y constructivas, además en ésta franja norte se presentan cinco de las seis zonas sísmicas de la Ciudad de México; lo que resulta ventajoso para los objetivos planteados.

5.2 Evolución de los reglamentos de construcción aplicables en la zona de estudio

En muchos sentidos los reglamentos de construcción concentran, de algún modo, las interrelaciones entre sistemas terrestres y sistemas humanos que componen el riesgo sísmico; dado que en ellos plasman, por un lado, el grado de conocimiento en sismos e ingeniería estructural alcanzados por la ciencia y la tecnología en general y por la comunidad de una región o territorio en particular. Por otro lado los reglamentos son parte de la normativa que componen el marco jurídico que rige la convivencia de un grupo social; esto significa que en los reglamentos de construcción, por sí mismos o en concatenación con otras normativas, también están plasmadas interrelaciones de carácter meramente social tales como políticas públicas, programas de protección civil, aspectos catastrales e inmobiliarios, gestión y administración de usos de suelo, conservación del patrimonio cultural, entre otros; que se gestan y modifican en una compleja convolución con los actores y demandas sociales presentes en una época determinada.

En relación a la zona estudiada en este trabajo, se presenta en la Tabla 5.1 un resumen de las principales características de los reglamentos de diseño estructural, haciendo énfasis en los requerimientos de diseño sísmico, aplicables a DBJ desde 1942 a la fecha, tomados de Alcocer y Castaño (2008).

REGLAMENTO VIGENTE (año de publicación)	REQUERIMIENTOS RELEVANTES	COEFICIENTES SÍSMICOS	FILOSOFÍA DE DISEÑO	OBSERVACIONES
1920 (No relevante para DBJ)	Dimensiones mínimas de elementos. Resistencias de materiales.	Ninguno	Esfuerzos permisibles	Basado en reglas y requerimientos de códigos de otros países.
1942	Altura máxima de edificios permitida = 35 m. Clasificación de estructuras en 8 tipos.	Cy = 0.10 tipo I Cy = 0.05 tipo II Cy = 0.25 tipos III a VI Cy = 0.01 tipo VII Cy = 0.0 tipo VIII	Esfuerzos permisibles	Por primera vez se consideran coeficientes de diseño sísmico. Sólo se requería diseño sísmico para edificios de 16 m de altura o mayores, y para estructuras del tipo II (estadios, teatros, escuelas).

REGLAMENTO VIGENTE (año de publicación)	REQUERIMIENTOS RELEVANTES	COEFICIENTES SÍSMICOS	FILOSOFÍA DE DISEÑO	OBSERVACIONES
1957 (regulación de emergencia)	<p>Cy depende del tipo de suelo (firme, transición, blando). Se clasifican los edificios de acuerdo a su ocupación en A, B y C. Se identifican los sistemas estructurales en: Clase 1 = Estructuras de concreto reforzado o acero sin muros de relleno que incrementen la rigidez lateral. Clase 2 = Marcos de concreto reforzado o acero con diagonales o muros anclados a la estructura. Clase 3 = Estructuras a base de muros de carga.</p>	Cy = 0.20 (grupo A, clase 2 en suelo blando).	Esfuerzos permisibles	<p>Por primera vez se consideran los efectos del suelo en el diseño sísmico. Por primera se acepta un método de diseño al límite como procedimiento alternativo. Se consideran efectos de torsión. Se limitan los desplazamientos entre pisos a 0.002 veces la altura del entrepiso.</p>

REGLAMENTO VIGENTE (año de publicación)	REQUERIMIENTOS RELEVANTES	COEFICIENTES SÍSMICOS	FILOSOFÍA DE DISEÑO	OBSERVACIONES
1966	<p>Se consideran dos tipos de suelo, el suelo de transición es incluido en la zona de suelo blando.</p> <p>Se redefinen los grupos A, B y C:</p> <p>Grupo A = edificios que deben permanecer en operación después de una emergencia urbana, que alojen contenidos invaluable de un área de desplante mayor a 400 m².</p> <p>Grupo C = Construcciones aisladas que no requieran inspección especial y aquellas cuya falla por sismo no ponga en peligro vidas, materiales o equipos invaluable.</p> <p>Grupo B = aquellas estructuras no incluidas en A o C.</p> <p>Los sistemas estructurales quedan definidos como:</p> <p>Clase 1 = Marcos rígidos capaces de resistir el 50% de la carga sísmica sin la contribución de muros</p>	<p>$C_y = 0.15$ para estructuras del Grupo B, Clase 3 localizadas en suelo blando.</p> <p>Para estructuras del Grupo A, el C_y del Grupo B se multiplica por 1.2.</p> <p>No se requiere el diseño sísmico para estructuras del Grupo C.</p>	Esfuerzos permisibles	<p>Se aceptan tres tipos de análisis:</p> <ul style="list-style-type: none"> + Estático simplificado: Para edificios de uno o dos niveles a base de muros de carga. + Fuerza lateral equivalente: Que debe considerar el esfuerzo cortante, así como efectos de volteo y torsión. + Análisis dinámico.

	<p>o diagonales. Se incluyeron edificios de 7 m de altura o de dos niveles.</p> <p>Clase 2 = Estructuras a base de muros.</p> <p>Clase 3 = tanques elevados, chimeneas y otras estructuras soportadas como péndulos invertidos.</p>			
--	---	--	--	--

REGLAMENTO VIGENTE (año de publicación)	REQUERIMIENTOS RELEVANTES	COEFICIENTES SÍSMICOS	FILOSOFÍA DE DISEÑO	OBSERVACIONES
1976	<p>Se consideran tres zonas geotécnicas de acuerdo al espesor del suelo:</p> <p>Suave para espesores de 20 m o más, transición para espesores entre 3 y 20 m y firme para menos de 3 m de espesor.</p> <p>Se consideran los beneficios de un comportamiento dúctil por medio de factores de reducción por ductilidad para fuerzas elásticas, Q, con valores de 1 hasta 6 de acuerdo a los materiales, sistema estructural y detallado.</p> <p>Las excentricidades accidentales para torsión de duplicaron.</p> <p>Los espectros de diseño consistieron en tres zonas:</p> <p>Primera, una rama lineal ascendente que inicia en PGA con periodo de 0s hasta un periodo menor al periodo fundamental del suelo, Segunda, una meseta hasta un</p>	La mayor aceleración para suelo blando fue de $C_y = 0.24 g$.	Estados límite.	Se emiten por primera vez las normas técnicas complementarias (NTC) para materiales estructurales (concreto, acero, madera y mampostería), para acciones seleccionadas (sismo, viento), y para partes de estructuras (cimentaciones). Los requisitos de análisis, diseño y detallado se incluyeron en las NTC's.

	periodo que corresponda a la intersección con una tercera rama descendiente de forma parabólica.			
--	---	--	--	--

REGLAMENTO VIGENTE (año de publicación)	REQUERIMIENTOS RELEVANTES	COEFICIENTES SÍSMICOS	FILOSOFÍA DE DISEÑO	OBSERVACIONES
1985 (regulación de emergencia)	El máximo valor permitido de Q se fijó 4. La excentricidad máxima aceptada para torsión debía ser menor al 20% de la mayor dimensión en planta.	Cy = 0.40g en la meseta de suelos blandos, Cy = 0.27g en la zona de transición.	Estados límite.	La dimensión mínima de las secciones de las columnas se fijó en 30 cm. Se duplicaron las cargas vivas para uso de oficinas.
1987	Se elimina el Grupo C para clasificación estructural pero el Grupo B se subdivide en B1 y B2 de acuerdo a su altura, área total y tipo de suelo. La zonificación de suelos fue revisada y redefinida, se introdujeron requisitos más severos de diseño y detallado para las zonas blandas y de transición. El factor de importancia del Grupo A se incrementó de 1.3 a 1.5.	Cy se incrementó de 0.27g a 0.32 g en la zona de transición.	Estados límite.	Se introdujeron requisitos para los componentes no estructurales que pudieran afectar el comportamiento sísmico de la estructura en su conjunto. Se incluyeron recomendaciones para la interacción suelo-estructura. Para estructuras de concreto reforzado, establecieron dos clases de concreto en base a su peso unitario, se requirió un concreto de mayor peso unitario para estructuras del Grupo A y del Grupo B1. Se adoptó el método de esfuerzos al límite para el diseño de acero estructural.

REGLAMENTO VIGENTE (año de publicación)	REQUERIMIENTOS RELEVANTES	COEFICIENTES SÍSMICOS	FILOSOFÍA DE DISEÑO	OBSERVACIONES
2004	Las estructuras son clasificadas en Grupos A, B1 y B2, en base a su importancia, altura y área de construcción. Se consideran tres tipos de acciones de acuerdo a su duración para análisis y diseño de estructuras: permanentes, variables y accidentales. Los factores de carga se definen en 1.4 para acciones permanentes y variables y en 1.1 para combinaciones con acciones accidentales. Se establecen zonas geotécnicas y resistencias de suelo para diseño.	Cy = 0.16 en zona I Cy = 0.32 en zona II Cy = 0.40 en zonas IIIa y IIIc Cy = 0.45 en zona IIIb Cy = 0.30 en zona IIId	Estados límite	Se determinan seis zonas sísmicas: I, II, IIIa, IIIb, IIIc y IIIId.

**Tabla 5.1 Requerimientos relevantes para diseño sísmico de estructuras en la Ciudad de México.
Resumido de: Alcocer y Castaño, (2008)**

Resulta pertinente hacer algunas precisiones, brevemente, sobre los términos asentados en la Tabla 5.1 para mayor claridad de su concepto.

El coeficiente sísmico se refiere a la aceleración a que será sometida la estructura por la acción de un sismo. Este coeficiente se expresa, generalmente, como una fracción de la aceleración de gravedad (g)

9.81 m/s²), de esta manera un coeficiente sísmico $C= 0.40$ expresa un 40% de la aceleración de gravedad. El sufijo y , esto es C_y , se refiere a la componente horizontal de la aceleración que actúa sobre la estructura. Aplicando la segunda ley de Newton:

$$F=ma$$

en donde F = Fuerza, m = masa y a = aceleración

El coeficiente sísmico horizontal C_y multiplicado por la masa contenida en la estructura, se traduce en una fuerza lateral que se aplicará a la estructura para su análisis y diseño.

La filosofía de diseño se refiere a la manera como se concibe el comportamiento del sistema estructural que se aplica, así como al comportamiento de los materiales de que está hecho. En la filosofía de esfuerzos permisibles se considera que la estructura sólo se deforma en un rango elástico, esto es que al verse sometida a una acción sufre una deformación proporcional al esfuerzo inducido por la acción; al cesar el esfuerzo, la estructura regresa a su estado original, análogamente a un elástico, que se deforma pero regresa a su forma original. En el caso de estados al límite, se considera que la estructura es capaz de deformarse más allá del rango elástico, lo que le proporciona una mayor resistencia, en términos de soportar mayores deformaciones sin colapsarse, aunque al cesar la acción la estructura no regresará a su estado original; en esta filosofía es importante considerar el factor de ductilidad Q el cuál es una relación entre la capacidad de deformación última, antes del colapso dividida entre la capacidad de deformación en el límite de rango elástico, conocido como esfuerzo y/o deformación de fluencia; esto es $Q = \Delta_{ult} / \Delta_{flc}$.

El *Grupo estructural* A, B o C, se refiere a la importancia de la estructura en cuanto a su uso. Así pues una estructura del grupo A se considera más importante, sea por que las pérdidas humanas y/o económicas de su colapso serían mayores en comparación a una estructura del grupo B o C, o bien porque por el tipo de servicio que se aloja; una estructura del grupo A, resulta vital que permanezca en servicio en caso de emergencias, por ejemplo hospitales y estaciones de bomberos y de rescate.

La *Clase estructural*, se refiere al sistema estructural de la construcción. Esto es si la construcción está soportada por marcos de concreto reforzado, o de acero, por muros de tabique, por muros de concreto, o bien por una combinación de los anteriores. Las clases estructurales también pueden referirse a tipologías especiales tales como tanques elevados, puentes, o chimeneas.

En cuanto a los tipos de suelo, esto se refiere a la consistencia mecánica del terreno (resistencia y deformabilidad). Los suelos blandos se refieren a aquellos que por sus características geológicas y geotécnicas son muy deformables y generalmente poseen poca capacidad de soportar cargas. En el otro extremo, los suelos llamados firmes, son poco deformables y con mayor capacidad de carga; en cuanto a los suelos de transición, se le llama de esta manera a aquellos que se ubican geográficamente entre zonas de suelos firmes y suelos blandos. Esta clasificación es muy importante, pues como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, el comportamiento dinámico (amplificación de ondas, período fundamental de vibración y factor de amortiguamiento) de los diferentes tipos de suelos determina en gran medida el grado de exposición del sistema. Generalmente una alta correlación entre la consistencia mecánica y el comportamiento dinámico del suelo.

5.3 Análisis de la vulnerabilidad sísmica de construcciones en la zona de estudio

La zona de estudio es la franja norte de la delegación Benito Juárez en la ciudad de México, incluyendo la mayor parte de las colonias Álamos, Atenor Salas, Viaducto Piedad, Narvarte oriente, Narvarte poniente, Del Valle norte, Nápoles, San Pedro de los Pinos y 8 de agosto, Figura. 5.9

Aplicando la metodología planteada en el capítulo anterior a la zona en estudio, utilizando la información vectorial del catastro del año 2000, se obtuvieron los siguientes resultados para un total de 7420 estructuras detectadas, (Tabla 5.2).

Año de construcción	No. de estructuras por año de construcción	Zona sísmica	No. de estructuras por zona sísmica	Índice de daño físico (Idf)	No. de estructuras por nivel de Idf
Hasta 1942	677	Zona I	537	0.00-0.05	6725
Entre 1943 y 1957	1872	Zona II	1819	0.051-0.15	34
Entre 1958 y 1966	1732	Zona IIIa	1503	0.151-0.50	353
Entre 1967 y 1977	1472	Zona IIIb	1936	0.501-0.90	238
Entre 1978 y 1985	813	Zona IIIc	1625	>0.90	70
Entre 1986 y 1995	854				
TOTAL	7420		7420		7420

Tabla 5.2 Estadísticas de las estructuras construidas hasta el año 2000 en la zona de estudio aplicando la metodología propuesta

El índice de daño físico obtenido puede relacionarse con un nivel de daño y una vulnerabilidad esperados en la estructura de acuerdo a lo siguiente, (Tabla 5.3).

Índice de daño físico (Idf)	Nivel de daño	Vulnerabilidad
0.00-0.05	Nulo	Muy baja
0.051-0.15	Ligero	Baja
0.151-0.50	Moderado	Media
0.501-0.90	Severo	Alta
>0.90	Completo	Muy alta

Tabla 5.3 Relación entre el índice de daño físico, nivel de daño y vulnerabilidad esperados en la estructura

Los niveles de daño mostrados en la Tabla 5.3, se han adaptado de los que Rivera (2005) propone para estructuras de puentes. Considerando que las estructuras que más se presentan en la zona en estudios son casas y edificios presentan, en general, una mayor redundancia estructural; y por tanto, una mayor capacidad de recibir daño sin colapsarse.

De una exploración de datos de la zona de estudio realizada con Arcgis se tiene que las estructuras presenta los siguientes promedios en cuanto a número de niveles, alturas, edad e índice de daño físico: Número de niveles promedio = 2.36 niveles; altura promedio = 8.25 m (es importante considerar que los datos catastrales asignan un altura de 3.5 metros por nivel); edad = 1969; Índice de daño físico (Idf) = 0.05.

De una revisión estadística a los datos anotados en la Tabla 5.3 se observa lo siguiente:

- El número de estructuras con una vulnerabilidad sísmica considerada alta o muy alta es de 308, estas representan el 4.15% del total de estructuras detectadas en la zona de estudio.
- 6759 estructuras presentan una vulnerabilidad muy baja o baja, esto es el 91.1% del total.
- El resto de las estructuras, 353 (4.75%) presentan una vulnerabilidad media.

Puede observarse que, en general, la zona de estudio es poco vulnerable ante la acción de un evento sísmico. Se hace ahora un análisis de ubicación y características de las estructuras con vulnerabilidad alta o muy alta:

- La ubicación de las estructuras con vulnerabilidad alta o muy alta se distribuye en las zonas sísmicas de la siguiente manera: Zona I = 0 estructuras; Zona II = 84 estructuras; Zona IIIa = 142 estructuras; Zona IIIb = 46 estructuras; Zona IIIc = 36 estructuras. Esto significa que 73.4% de las estructuras más vulnerables se ubican en las zonas sísmicas II (27.3%) y IIIa (46.1%).
- Las 308 estructuras consideradas con vulnerabilidad alta o muy alta tienen 5 niveles o más.
- Por reglamento de diseño los porcentajes de estructuras con vulnerabilidad alta o muy alta son los siguientes: reglamento de 1920 = 4 estructuras; reglamento de 1942 = 28 estructuras; reglamento de 1957 = 63 estructuras; reglamento de 1966 = 146 estructuras; reglamento de 1976 = 41 estructuras; reglamento de 1985 = 26 estructuras.

Una vez aplicada la metodología propuesta se han generado tres nuevos conjuntos de datos en formatos shape: El primero llamado *edificios sin cambio* (edif_sinc_2008) el cual incluye las estructuras en las que

no se detectaron modificaciones relevantes en su planta o en su altura con respecto a la base de datos del catastro del año 2000. El segundo llamado *edificios actualizados* (edif_actl_2008) que incluye las estructuras que no cambiaron en planta pero en los que altura obtenida con LIDAR se varió notoriamente con respecto a la incluida en el catastro del año 2000, durante los recorridos en la zona se pudo observar que estas estructuras son, en la mayoría de los casos, de tipo bóveda, esto es que son estructuras de uno o dos niveles pero de una altura considerablemente mayor tales como cines, iglesias, bodegas y tiendas comerciales. El tercero llamado *edificios nuevos* (edif_nvos_2008) en el que incluyen las estructuras cuya planta y/o altura discrepan notoriamente con respecto a las del catastro del año 2000.

Las estadísticas de los tres shapets generados relevantes para este trabajo se condensan en la Tabla 5.4.

BASE	No. de estructuras	No. de estructuras con vulnerabilidad alta o muy alta	% de estructuras con vulnerabilidad alta o muy alta	Altura promedio de las estructuras (m)	Índice de daño físico promedio
Edificios sin cambio	5369	179	3.3	6.55	0.04
Edificios actualizados	186	17	9.13	11.9	0.12
Edificios nuevos	441	75	17	13.05	0.19
TOTALES	5996	271	4.5	7.19 *	0.054 *

Tabla 5.4 Estadísticas relevantes de las estructuras de la zona de estudio después de aplicar la metodología propuesta con datos LIDAR de 2008. (*Promedio ponderado)

De los resultados obtenidos resaltan los siguientes aspectos:

1. El número de estructuras detectadas a partir de los datos catastrales del año 2000 fue de 7420, mientras que el total de estructuras detectadas después de aplicar la metodología propuesta fue de 5996. Esta disminución en el número de estructuras puede entenderse debido a que la mayoría de las estructuras nuevas ocupan, cada una, dos o más parcelas del catastro del año 2000.
2. El porcentaje de estructuras con vulnerabilidad alta o muy alta crece ligeramente, del 4.15% en el año 2000 al 4.5% en 2008. Este incremento puede entenderse a que la mayoría de los edificios nuevos son considerablemente más altos que los edificios que ocupaban esas parcelas en el pasado. Aquí es importante recalcar que la metodología utilizada en este trabajo tiene como parámetro relevante el período fundamental de vibración, el cuál para la tipología de edificios está estrechamente ligado a su altura.

3. La altura promedio de las estructuras en la zona de estudio pasa de 8.25 metros en el año 2000 a 7.19 metros en el año 2008. Esta disminución se atribuye a que en la base catastral del año 2000 se asignó una altura estándar de 3.5 metros por nivel, aunque en realidad en la mayoría de las estructuras observadas en la zona es de alrededor de 2.5 metros por nivel.

4. El índice de daño físico (Idf) promedio, a partir del cual se estima la vulnerabilidad sísmica de acuerdo a la metodología propuesta, prácticamente se mantuvo igual, 0.05 en el año 2000 y 0.054 en el año 2008.

5.4 Análisis de resultados

Un aspecto muy importante de considerar, en cualquier campo de conocimiento, al proponer y/o utilizar una metodología para conseguir un objetivo, es el referente a la validación. Siempre será necesario realizar una compulsión entre los resultados obtenidos por la metodología propuesta contra algún método o documento que sirva de patrón para estar en condiciones de inferir si los resultados guardan o no congruencia con lo que ya ha sido establecido y aceptado.

En el caso de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras, no es sencillo definir un patrón que sirva como referente para validar la metodología que se ha propuesto en este trabajo. La gran cantidad de parámetros involucrados en el comportamiento y resistencia de estructuras por efectos sísmicos, los diversos enfoques para abordar el concepto de vulnerabilidad y riesgo así como el cambiante escenario del peligro sísmico hacen que establecer un patrón de comparación sea complicado. Aunado a lo anterior, el aspecto humano de la vulnerabilidad, esto es, la susceptibilidad de sufrir daño de un grupo humano es en extremo compleja de evaluar. En este trabajo no se aborda el aspecto humano de la vulnerabilidad.

Por lo anterior, y para fines de establecer esa compulsión requerida, en este trabajo se utilizó un enfoque de pérdidas utilizado por las compañías de seguros para comparar los resultados obtenidos. Para ello a continuación se hace una breve reseña de este enfoque.

Por su naturaleza catastrófica, el riesgo de terremoto requiere un tratamiento especial por parte del sector asegurador, ya que el efecto de un gran sismo en una región determinada, puede originar enormes pérdidas humanas y económicas. Por sus características naturales y para efectos de seguro, el riesgo de terremoto puede ser tratado en forma aislada, como un ramo especial. Sin embargo, para efectos contables y administrativos, este seguro se vende como un endoso a la póliza del ramo de incendio, Izquierdo y Avilés (1993).

Para la determinación de la estructura técnica de este seguro, investigadores de la UNAM, han presentado diversos estudios basados en las características geotécnicas de las diferentes regiones o zonas potencialmente sísmicas de la República Mexicana y de la distribución de los epicentros registrados en el siglo actual, así como sus coordenadas, magnitud y profundidad, Izquierdo y Avilés (1993). Figura 5.10



Figura 5.10 Zonas sísmicas de la República Mexicana. Tomado de: Izquierdo y Avilés (1993)

Para el Distrito Federal, se presenta un esbozo de la microzonificación sísmica, en donde la zona G es la de mayor peligro, ya que el movimiento telúrico es más fuerte en donde predominan terrenos blandos. En estos lugares, el subsuelo se comporta como una caja de resonancia ante la excitación producida por las ondas sísmicas con igual período de oscilación, amplificándose de 5 a 20 veces. Como puede observarse en la Figura 5.11, el Valle de México está dividida en las zonas sísmicas E, F, G norte-centro, G sur y H, Izquierdo y Avilés (1993).

MICROZONIFICACIÓN EN EL VALLE DE MÉXICO

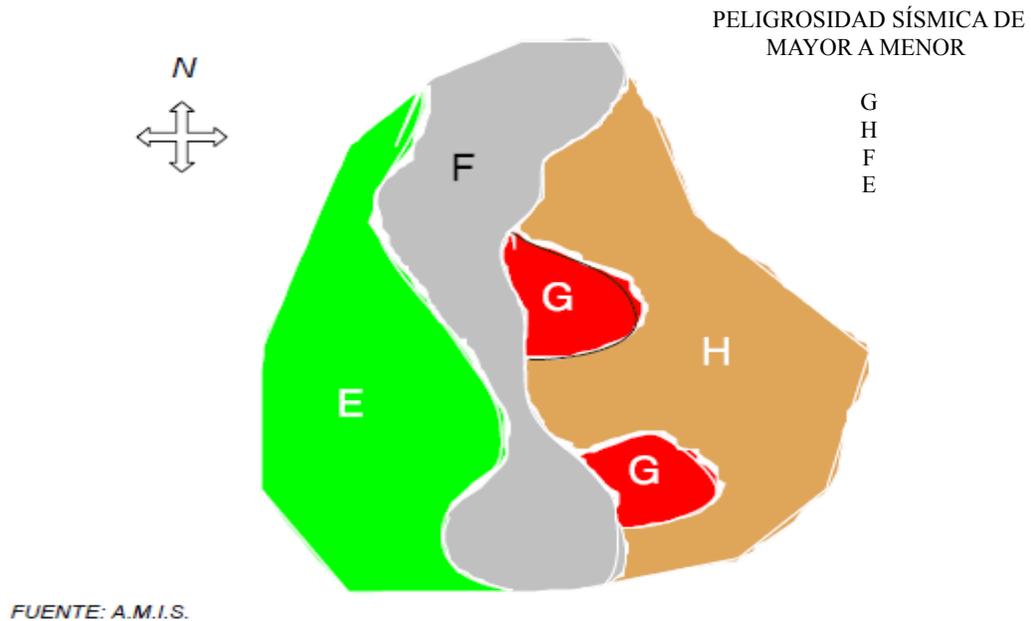


Figura 5.11 Microzonificación Sísmica del Valle de México. Tomado de: Izquierdo y Avilés (1993)

De acuerdo con ERN (2004) la zona G norte-centro comprende, dentro del perímetro de la zona de estudio, las siguientes colonias: Atenor Salas, Narvarte Poniente, Álamos, Del Valle Norte, Viaducto Piedad y Narvarte Oriente; mientras que las colonias Nápoles, San Pedro de los Pinos y 8 de agosto, se ubican en la zona F.

En el sector asegurador, los procedimientos técnicos que fundamentan el cálculo de tarifas para los diversos seguros de daños, no pueden ser igualmente utilizados para obtener primas de riesgo para el seguro de terremoto, por tratarse de un riesgo de carácter catastrófico cuyas características se refieren a largos períodos de recurrencia y bajas frecuencias en el número de eventos, con elevados costos de siniestralidad. Por ello, la estimación de pérdidas se realiza mediante la aplicación de modelos matemáticos basados en la teoría de las probabilidades. Para tales efectos, es necesario, determinar geográficamente la zona en la cual se ubican los riesgos expuestos; una región localizada cerca de una falla geológica tiene más probabilidad de ser afectada por sismo, que la más lejana. Los períodos de recurrencia asociados a temblores característicos, debieran considerarse en la determinación de cuotas de tarifa para el riesgo de terremoto. Estos períodos de recurrencia se utilizan para la estimación de la pérdida máxima probable, Izquierdo y Avilés (1993).

La pérdida máxima probable (PMP) se define como el monto total de pérdidas monetarias de los bienes asegurados, por la ocurrencia de un terremoto de alta intensidad, dentro de un período específico de tiempo, llamado período de recurrencia, y se expresa en porcentaje de la suma asegurada. La creciente concentración de valores en zonas de alto grado de exposición a terremoto, tiene como consecuencia un aumento considerable en la potencialidad de siniestros por catástrofes naturales. Por ello, el cálculo de la pérdida máxima probable resultante de un evento sísmico, debe ser considerado por la empresa aseguradora de vital importancia para su protección y para la propia constitución de sus reservas, Izquierdo y Avilés (1993).

Con base en un estudio realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en 1963, se estimó en 12% la pérdida monetaria máxima como porcentaje de la suma asegurada. Dicho porcentaje determinaba el requerimiento de capital, así como el programa anual de reaseguro catastrófico de las empresas para el seguro de terremoto. Cabe señalar, sin embargo, que este porcentaje no estaba asociado a un período de recurrencia dado. Ante esta situación, surgió la incógnita sobre cuál debería ser la tasa adecuada para la pérdida máxima probable relacionada a la acumulación del mercado, correspondiente a un período de recurrencia específico. Para tales efectos, el Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó en 1992 un estudio para Aseguradora Mexicana S.A., el cual tenía por objetivo evaluar los niveles de riesgo sísmico que enfrentan las construcciones en la Ciudad de México. En el estudio se evaluaron las pérdidas esperadas ante un temblor máximo probable de 8.2 grados en la escala de Richter, a una distancia de 280 km del Distrito Federal. En este caso se calculó una pérdida esperada del 4.63% para toda la Ciudad de México, considerando la distribución real de los tipos de construcción que se incluyeron en el estudio, Izquierdo y Avilés (1993).

Para efectos del seguro de terremoto, los riesgos se clasifican de acuerdo a la suma asegurada, en dos grandes tipos: En grandes riesgos, cuya suma asegurada acumulada hasta 1993 era mayor o igual a 50 millones de dólares para una sola ubicación y 100 millones de dólares para dos o más ubicaciones; en ambos casos, la tarifa se determina por los reaseguradoras que asumen el riesgo, debido a que la retención de las aseguradoras es mínima; y en riesgos normales, que comprenden a riesgos ordinarios, industriales y comerciales, cuya tarifa está en función a la zona sísmica. La tarifa para riesgos normales, está basada en un estudio realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en 1988 para la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros (AMIS), que considera los efectos del terremoto de 1985 en el Valle de México y en otras regiones y que determina las cuotas de riesgo para edificios de acuerdo al tipo de estructura por zona sísmica. A cada zona sísmica del país le corresponde una cuota de riesgo diferente que está en función del nivel de peligrosidad sísmica en cada región, tomando en cuenta las características del subsuelo, la tarifa y tipo de construcción de edificios. Los edificios se clasifican en dos grupos de acuerdo

a su altura. Las cuotas de riesgo para contenidos se obtuvieron mediante una ponderación de las cuotas de riesgo y están en función de la zona sísmica, independientemente de las características del inmueble donde se encuentren ubicados. Las pérdidas consecuenciales de terremoto no se cubren desde 1989, debido a la complejidad en la estimación de los daños probables. Las compañías de seguros distribuían el 100% de la prima de la siguiente manera: en promedio y a nivel mercado se cedía el 70% al reaseguro en contratos proporcionales y las aseguradoras retenían el 30% restante. De la prima cedida, recibían el 14% de comisión por parte de los reaseguradores. Con este 44% tenían que pagar el 16.5% por costo de la cobertura de exceso de pérdida en el reaseguro no proporcional, considerando un costo promedio por línea “rate on line” del 5%. la diferencia de 27.5% se destinaba a solventar los gastos de administración, adquisición y utilidad, resultando un excedente de 0%, aún cuando no hubiese ocurrido un terremoto de graves consecuencias para el sector asegurador, Izquierdo y Avilés (1993).

Hacia 1993, y como consecuencia de la reducción de la capacidad del mercado internacional de reaseguro, se han incrementado considerablemente los costos de las coberturas de exceso de pérdida. Lo anterior, aunado a la forma en que se constituía e incrementaba la reserva de riesgos catastróficos, ocasionó insuficiencia de la tarifa, originando pérdidas a las aseguradoras, aún cuando no hubiera ocurrido ningún siniestro de esta naturaleza. Ante esta problemática, la Comisión Nacional de Seguros y Fianzas ha aprobado una nueva tarifa mínima, única para todas las instituciones de seguros que operan el ramo de terremotos:

1. Para el caso de grandes riesgos, se incrementará la suma asegurada acumulada a 100 millones de dólares para riesgos con una sola ubicación y 200 millones de dólares para riesgos con dos o más ubicaciones. Al igual que en la tarifa anterior, la tarifa para grandes riesgos se determinará por lo reaseguradores que asumen el riesgo.
2. Para los riesgos normales, se consideran las coberturas básicas para edificios, contenidos y pérdidas consecuenciales (que no se otorgaba desde 1989).
3. Para el caso de edificios, las zonas sísmicas B y H, se desglosan en B, B1 y H1, H2 respectivamente.
4. La clasificación de edificios se abre a tres categorías: bajos de 1 a 6 pisos; intermedios, de 7 a 12; y altos de 13 en adelante. Asimismo, se definen 8 tipos de estructuras en vez de 5.
5. Se otorga la cobertura de contenidos por zona sísmica y altura y se vuelve a considerar la cobertura de pérdidas consecuenciales por terremoto.

Los incrementos promedio de la tarifa propuesta respecto a la tarifa anterior, repercuten principalmente en los edificios intermedios. Estas comparaciones se presentan en la Tabla 5.5.

ALTURA	EDIFICIOS	CONTENIDOS	GLOBAL
BAJOS (1-6 PISOS)	40%	9%	17%
INTERMEDIOS (7-12 PISOS)	24%	118%	55%
ALTOS (13 EN ADELANTE)	2%	63%	23%
GLOBAL	23%	36%	30%

Tabla 5.5 Incremento promedio de la tarifa propuesta respecto a la anterior, (Izquierdo y Avilés, 1993)

En los estudios realizados por el Instituto de la UNAM en 1992-1993 para Aseguradora Mexicana S.A, se determinaron diferentes porcentajes de pérdidas máximas probables para microzonas del Distrito Federal. Para efectos de determinar la pérdida máxima probable por evento, se realizó un promedio ponderado de los porcentajes diferenciados por microzona, dando como resultado el 4.63%, Figura 5.12.

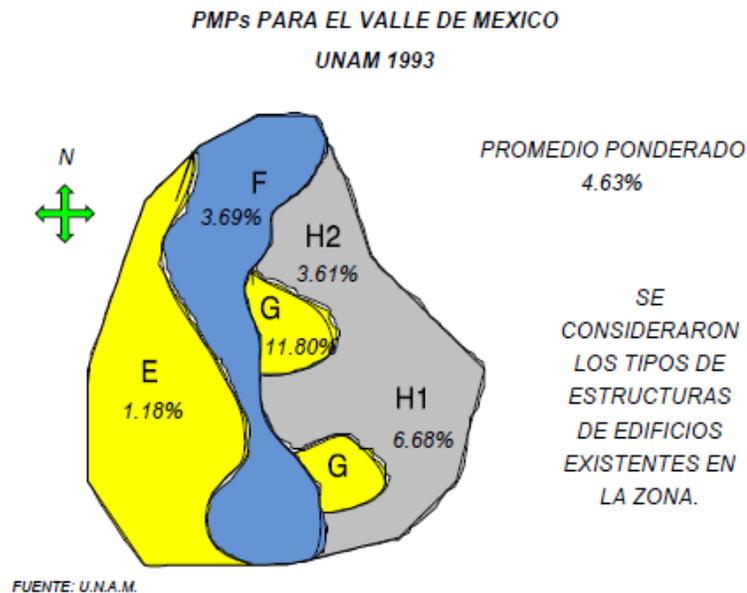


Figura 5.12 PMPs PARA EL VALLE DE MÉXICO. UNAM 1993. Tomado de: Izquierdo y Avilés (1993)

Cabe señalar que para el cálculo de dicha cifra no se consideraron únicamente los bienes asegurados, sino que se tomó en cuenta el total de la población de edificios del Valle de México, así como los diferentes tipos de estructuras. Una reaseguradora de Londres “E.Q.E International” consideró que el “PMP” del 4.63% fue en realidad una estimación del daño máximo probable, el cual representaba una medida aceptable del promedio de pérdidas en todos los edificios de la Ciudad de México, como resultado de un gran terremoto. Sin embargo, afirmaron que dicho porcentaje no podría ser equivalente a una pérdida máxima probable real. Según esta empresa londinense, el PMP real debería estar asociado con el 90avo percentil, es decir, la pérdida se espera que no exceda 90% de las veces. Basándose en la experiencia de “E.Q.E Internacional” un 90avo percentil podría ser del orden del 25% al 75% más grande que el promedio del 4.63%, es decir, el PMP real debería estar entre 6% y 9% de los daños ocasionados, Izquierdo y Avilés (1993).

Antes realizar una compulsa de los resultados obtenidos con la metodología propuesta contra el enfoque de pérdidas utilizado por el sector asegurador, se anotan los siguientes aspectos con fines de ponderar si el enfoque asegurador es representativo para validar la metodología propuesta en este trabajo:

1. En los estudios realizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en 1992, referidos por Izquierdo y Avilés (1993), de los que se obtuvo una pérdida esperada del 4.63% se planteó un escenario ante la ocurrencia de un evento sísmico de 8.2 de magnitud igual a 8.2 grados en la escala Richter a una distancia de 280 km. Este escenario guarda mucha correlación con el sismo de septiembre de 1985. Los espectros de diseño utilizados en este trabajo son los vigentes al reglamento de 2004, Figura 4.5, no obstante dichos espectros se han obtenido en gran medida por las características del sismo de 1985.
2. En la obtención de pérdidas máximas probables (PMPs) con el enfoque asegurador clasifica edificios por alturas. Las funciones de vulnerabilidad utilizadas en este trabajo toman como parámetro principal el período de vibración dominante de la estructura evaluada, el cual se ha determinado en función del número de niveles, los cuales se relacionan necesariamente, en la mayoría de los casos, con la altura del edificio.
3. La microzonificación sísmica utilizada en el enfoque asegurador, Figura 5.11, refiere a un mayor peligro en terrenos blandos y a uno menor en suelos firmes. La zonificación sísmica utilizada en la metodología propuesta, Figuras 4.4 y 5.8, distingue bien terrenos firmes y blandos.
4. La zona de estudio en este trabajo, Figura 5.9, está bien delimitada en las zonas sísmicas F y G del

enfoque asegurador, ERN (2004).

La correlación entre los aspectos listados anteriormente permiten considerar que el enfoque asegurador es un buen referente para ser utilizado para comparar y en validar los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta toda vez que los parámetros, zonificación sísmica, y escenario sísmico considerado son prácticamente iguales. Por otro lado, el enfoque asegurador es utilizado por compañías del ramo y autoridades con fines de garantizar la tenencia de fondos suficientes para cubrir daños ocasionados por la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud por lo que puede considerarse como un patrón establecido y aceptado, al menos en el sector asegurador.

Al comparar el valor de 4.63% para la pérdida máxima probable (PMP) determinado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM Izquierdo y Avilés (1993) con el 5.4% de índice de daño físico (Idf) promedio obtenido en la zona de estudio al aplicar la metodología propuesta, puede observarse una concordancia aceptable entre ambos parámetros; para lo cual es pertinente hacer algunas consideraciones:

1. La pérdida máxima probable, como se ha anotado anteriormente, es relativo al monto total de pérdidas monetarias de los bienes asegurados, (Izquierdo y Avilés, 1993); esto es, que se refiere a los edificios a los que las compañías de seguros han otorgado una póliza contra daños por eventos sísmicos y que por lo tanto no incluye a los edificios no asegurados. El índice de daño físico promedio obtenido, por su parte, no hace esta distinción. No obstante, es importante mencionar que la firma londinense E.Q.E International consideró que el “PMP” del 4.63% fue en realidad una estimación del daño máximo probable, el cual representaba una medida aceptable del promedio de pérdidas en todos los edificios de la Ciudad de México, Izquierdo y Avilés (1993); por lo que podría considerarse como un indicador de daño en edificios, estén o no asegurados.
2. La Figura 5.12 muestra que en la zona sísmica G del Valle de México, en la que se ubican la mayoría de las colonias de la zona de estudio, la PMP es de 11.8%, esto es más del doble del promedio en toda la Ciudad de México. A este respecto, es importante considerar que, como ya se refirió anteriormente, la delegación Benito Juárez es la municipalidad más rica del país; por lo que es de esperar que el valor, tanto en construcción como en contenidos, de los edificios sea mayor que el promedio de toda la ciudad, por lo que puede considerarse que esto debe influir notoriamente en una PMP más alta; sobre todo si consideramos que en edificios de altura media (de 7 a 12 pisos) el incremento en la tarifa de contenidos es la más alta, ver Tabla 5.5. En la zona de estudio se obtuvo una altura promedio de 7.19 m; esto es, aproximadamente, 3 pisos.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

El riesgo sísmico en zonas urbanas es un concepto complejo; en él intervienen fenómenos, tanto naturales como antropogénicos, cambiantes y cuyo comportamiento es difícil de predecir. En este entorno, disponer de metodologías que permitan estimar la vulnerabilidad, esto es las pérdidas que pudiesen presentarse ante la ocurrencia de un sismo son, sin duda, de gran valía. En este trabajo se ha presentado la factibilidad de utilizar datos geospaciales con el fin de obtener parámetros relevantes en la estimación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras en la zona norte de la Delegación Benito Juárez, Ciudad de México. Se utilizaron datos geospaciales en formato vector y raster. Los datos vectoriales primeros tomados de información catastral del año 2000 y que permite generar información sobre dimensiones y características tipológicas de las áreas construidas; los datos raster consistieron en imágenes satelitales y un modelo digital de elevación generado de un levantamiento LIDAR del año 2008.

La metodología propuesta en este trabajo para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios en zonas urbanas es simple y puede llevarse a cabo utilizando un software estándar para el manejo de datos geospaciales tanto en formato vectorial como en formato raster. Se utilizaron algoritmos para la obtención de alturas LIDAR, Silván (2014) lo cual permitió actualizar los datos de alturas de las construcciones contenidas en el catastro del año 2000 a las alturas existentes al año 2008 y determinar la vulnerabilidad de las construcciones mediante funciones de vulnerabilidad para las tipologías consideradas: casas y edificios.

Las funciones de vulnerabilidad utilizadas, Rivera (2013); son, en forma, fáciles de aplicar e interpretar. No obstante, en fondo, son robustas al permitir la obtención de índices de daño físico a partir de parámetros relevantes tales como alturas y períodos fundamentales de vibración para algunos tipos de estructuras. Un gran ventaja de estas funciones es que han sido desarrolladas en México por investigadores mexicanos, lo que es garantía de ser congruentes con las prácticas de construcción en el país, además se que pueden usarse con espectros de diseño o de sitio. En este trabajo se utilizaron los espectros de diseño vigentes en la normativa, si bien lo mejor es disponer de espectros de sitio para sismos de magnitud que comúnmente ocurran ya que los espectros de diseño son envolventes de espectros de sitio suavizados y que generalmente consideran sismos de una magnitud muy grande.

Los resultados obtenidos, mostrados en la Tabla 5.4, muestran los cambios detectados mediante así como los índices de daño físico en las estructuras de la zona de estudio utilizando la metodología propuesta.

BASE	No. de estructuras	No. de estructuras con vulnerabilidad alta o muy alta	% de estructuras con vulnerabilidad alta o muy alta	Altura promedio de las estructuras (m)	Índice de daño físico promedio
Edificios sin cambio	5369	179	3.3	6.55	0.04
Edificios actualizados	186	17	9.13	11.9	0.12
Edificios nuevos	441	75	17	13.05	0.19
TOTALES	5996	271	4.5	7.19 *	0.054 *

Tabla 5.4 Estadísticas relevantes de las estructuras de la zona de estudio después de aplicar la metodología propuesta con datos LIDAR de 2008. (*Promedio ponderado)

De los resultados obtenidos se observa que la zona de estudio tiene una baja vulnerabilidad sísmica (al año 2008) ya que sólo un 4.5 % de las estructuras presentan valores altos o muy altos.

En este trabajo se ha presentado la factibilidad de utilizar datos geoespaciales para la obtención de parámetros relevantes en la estimación de la vulnerabilidad sísmica de construcciones en zonas urbanas. Se observa que el uso combinado de datos geoespaciales vectoriales y raster permite la una estimación rápida de áreas construidas, así mismo el uso de sistemas de información geográfica permite una visualización amigable de parámetros físicos relevantes tales, como: formas, alturas y densidades de construcción; lo que, aunado, con información catastral permite inferir con rapidez una textura en configuración de estructuras en zonas altamente pobladas; si bien no es posible determinar con certeza los sistemas estructurales de las construcciones, como tampoco es posible evaluar aspectos importantes tales como materiales de construcción y estado de conservación. Si bien los parámetros que se han obtenido son útiles y permiten, con un grado de concordancia aceptable, una primera aproximación para una evaluación de la vulnerabilidad sísmica; se considera que es posible llevar a cabo trabajos futuros para parámetros adicionales. A este respecto, se recomienda trabajar en la medición de hundimientos y desplomes de edificios, para lo cual algunas técnicas de con imágenes de RADAR pueden ser útiles, esto en combinación con una estimación de pesos de construcciones, aprovechando los modelos 3D que son factibles de generarse con el uso de sistemas de información geográfica, permitiría evaluar los efectos de la consolidación suelos en el comportamiento dinámico de estos en algunas zonas de la ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

- Alam, J. et al (S/F). **Seismic Vulnerability Assessment of existing RC Buildings in GIS Environment**. Earthquake Engineering Research Center, Chittagong University of Engineering & Technology. Bangladesh.
- Alcocer, Sergio M. y Castaño Víctor M. (2008). **Evolution of codes for Structural Design in Mexico**. Structural Survey, Vol. 26, No.1. pp 17-28. Emerald Publishing Group Limited. 2008.
- Caliskan, S. et al (2005). **Earthquake Vulnerability Indicators and Vulnerability Assessment Using Remote Sensing in Istanbul**. 1st.EARsel Workshop of the SIG urban remote sensing Humboldt-Universität. Berlin, Alemania. 2006.
- CD, (2009). **Perfil socio-económico del Distrito Federal**. Cámara de Diputados, H. Congreso de la Unión; Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, CEFP/037/2009. México. 2009.
- Chuvieco, E. (2002). **Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio**. Editorial Ariel. Barcelona, España.2002.
- Contreras Bustamante, Raúl (2001). **La Ciudad de México como Distrito Federal y entidad federativa**. Edit. Porrúa. México. 2001.
- DBJ, (2013). **Página Web de la Delegación Benito Juárez**. <http://www.delegacionbenitojuarez.gob.mx/>. México. 2013.
- De Gortari Rabiela, Hira et al (1998). **La Ciudad de México y el Distrito Federal: Una historia compartida**. Instituto de Investigaciones Históricas José María Mora. México. 1998.
- Díaz, O. Et al (2004). **Funciones de vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios: marcos de concreto reforzado**. Informe del CENAPRED sobre análisis de vulnerabilidad y riesgo de construcciones urbanas ante perturbaciones sísmicas y eólicas. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. 2004. **En:** (Rivera, 2013)
- ERN (2004). **Delimitación de zonas AMIS en el Distrito Federal de acuerdo a su riesgo sísmico, 2004**. ERN Ingenieros Consultores S.C. México. 2004
- Esteva, L. Et al (2002). **Life-cycle optimization in the establishment of performance-acceptance parameters for seismic design**. *Structural Safety* 24, 187-204. **En:** (Rivera, 2013)
- Flores, L. et al (2006). **Evaluación de la vulnerabilidad de la vivienda ante sismo y viento. Guía Básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos**. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. 2006. **En:** (Rivera, 2013)
- Flores, L. Y Reyes, C. (2004). **Funciones de vulnerabilidad para vivienda construida con muros de carga de mampostería y sujeta a la acción de sismo**. Informe del CENAPRED sobre análisis de vulnerabilidad y riesgo de construcciones urbanas ante perturbaciones sísmicas y eólicas. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. 2004. **En:** (Rivera, 2013).
- Hartmut, S. Et al (1991). **Anatomy of an evolving island: tectonic and eustatic control in south**

Central American fore-arc area. Sedimentation, Tectonics and Eustasy. Seelvel Changes at Active Margins. Special Publication Number 12, International Association of Sedimentatologist. Blackwell Scientific Publications. London. 1991. **En:** Santoyo E. Et al (2005).

Hermosilla, T, et al (2011). **Evaluation of Automatic Building Detection Approaches Combining High Resolution Images and Lidar Data.** Remote Sensing 2011,3, 1188-1210.

Izquierdo, Emma. Y Avilés, Israel (1993). **Medidas para el Seguro de Terremoto.** Comisión Nacional de Seguros y Fianzas. Serie Documentos de Trabajo. Documento de trabajo No.22. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. México, 1993.

Kwon, O.S. Y Kim, E.S. **Evaluation of building period for seismic design.** Earthquake Engineering and Structural Dynamics 39. 1569-1583. **En:** (Rivera, 2013).

Meng, X et al (2009). **Morphology-Based Building Detection from Airborne Lidar Data.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.75, No. 4, april 2009. ASPRS. 2009.

Moreno et al (2008). **Sistemas y análisis de información geográfica.** Alfaomega grupo editor. México. 2008.

Morquecho, C. et al (2003). **Reporte preliminar de los registros del temblor del 21 de enero de 2003 en las costas de Colima (M = 7.6) obtenidos con la red de observación sísmica del CENAPRED.** Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. 2003.

NOAA (2012). **Lidar101: An Introduction to LIDAR Technology, Data and Applications.** National Oceanic and Atmospheric Administration. USA. 2012.

NTC-concreto. (1996). **Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.** Diario Oficial de la Federación. México. 1996. **En:** (Rivera, 2013).

NTC-sismo. (1995). **Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.** Diario Oficial de la Federación. México. 1995. **En:** (Rivera, 2013).

NTC-sismo (2004). **Normas técnicas complementarias para diseño por sismo.** Gobierno del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. 2004.

Peralta, Henry (2002). **Escenarios de vulnerabilidad y daño sísmico de edificaciones de mampostería de uno y dos pisos en el barrio San Antonio, Cali, Colombia.** Proyecto de grado. Universidad del Valle. Colombia. 2002.

Pigeon, Patrick (2012). **Seminario: Los retos en la gestión del desastre desde un enfoque geográfico.** Cátedra de Geografía Humana *Elisée Reclus*. México 2012.

Polli, D. et al (2007). **Seismic Vulnerability Assessment in the Framework of GEO: a case of study in Messina, Italy.** Università di Pavia. Italia. 2007.

RCDF, (1993). **Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.** Diario Oficial de la Federación. México. 1993. **En:** (Rivera, 2013)

Ricci, P. et al (2011). **Seismic Vulnerability Assessment Using Field Survey and Remote Sensing Techniques.** University of Napoles Federico II. Italy. 2011.

Rivera, D. (2007). **Evaluación simplificada de la vulnerabilidad sísmica de puentes urbanos.** Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. 2007.

Rivera, D. et al (2013). **Evaluación de la vulnerabilidad sísmicas de las construcciones del municipio de Naucalpan.** En: XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Veracruz, México. 2013.

Santoyo, E. et al (2005). **Síntesis geotécnica de la cuenca del valle de México.** TGC geotecnia SA de CV. México. 2005.

SGM (2012). **Atlas de peligros del municipio de Reforma, Chiapas.** Convenio de colaboración entre el Servicio Geológico Mexicano y la Secretaría de Seguridad Pública. Chiapas, México. 2012.

Silván, J.L. et al. (2014). **Demografía Celestial: Percepción Remota para Estimación de Población en Áreas Geoestadísticas Básicas. Artículo en revisión.** CentroGeo A.C. México. 2014.

Taubenböck et al (2008). **Vulnerability assessment using remote sensing: The earthquake prone mega-city Istanbul, Turkey.** German Remote Sensing Center, German Aerospace Center. Wessling, Germany

Wang, Dan et al. (2008). **A Method of High-Resolution Remote Sensing Images Building on Edge Extraction.** The International Archives of Photogrammetry, remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing, China. 2008.