



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.

FACULTAD DE GEOGRAFÍA

**“EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EL ÁREA URBANA DE
TIJUANA, BAJA CALIFORNIA, MEDIANTE EL USO DE UNA
PLATAFORMA DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA”**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN
GEOGRAFÍA PRESENTA:**

JUAN CARLOS GARATACHIA RAMÍREZ

ASESOR:

DR. JOSÉ EMILIO BARÓ SUÁREZ

ASESOR EXTERNO:

DR. CARLOS ISIDRO HUERTA LÓPEZ

REVISORES:

DR. LUIS MIGUEL ESPINOSA RODRÍGUEZ

M. EN G. JULIO CÉSAR CARBAJAL MONROY

TOLUCA, MÉXICO, ABRIL DE 2013



AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Gracias a Dios por haberme permitido llegar a este mundo, por las cosas buenas que me ha dado, pero sobre todo por las pruebas y retos de vida que forman parte del plan que Él tiene para mí. Mi confianza y fe en Él me han permitido concluir esta etapa de mi vida aún en los momentos más difíciles.

Dedico este trabajo a mis padres y les agradezco por haberme dado la vida. A mi madre, por ser la fuente inagotable de amor, cariño, motivación y perseverancia que desde mi primer día me ha acompañado e impulsado para seguir. ¡Gracias mamá, te amo!

A mi padre, quien ha sido ejemplo de disciplina, esfuerzo y sacrificio. Su vida ha sido fuente de inspiración y motivo para esforzarme cada día más. Sus palabras y experiencias han sido la guía para superarme personal y profesionalmente. ¡Gracias papá, te amo!

A mis hermanos Abraham y Sergio, gracias por todo su cariño, ustedes son la razón por la cual cada día quiero ser mejor persona. Gracias por todos los momentos que hemos compartido, en los que hemos reído, cantado y también entristecido. ¡Siempre estaré para ustedes, los amo!

A Dzoara, gracias por ser mi compañera de vida, mi amiga y mi amor. Pero sobre todo gracias por ser ese ángel que está conmigo en todo momento, por inspirarme, motivarme a no caer ante la adversidad y por recordarme siempre que todo se puede lograr con esfuerzo y amor. ¡Te amo!

Gracias a la Universidad Autónoma del Estado de México y a la Facultad de Geografía por permitirme formar parte de la institución, por todo el apoyo que recibí desde el primer día que llegué y a mis profesores. Agradezco en especial al Dr. Noel Pineda y a su equipo de trabajo.

Agradezco al Dr. José Emilio Baró Suárez, antes que nada por brindarme su amistad, por el apoyo moral y motivación. De la misma manera agradezco por su apoyo en la dirección de este trabajo y por que siempre tuvo el comentario atinado para lograr los mejores resultados.

Gracias al Dr. Carlos Huerta López, antes que nada por haberme recibido en su centro de trabajo, por haber confiado en mí y aceptado ser parte de la dirección de este trabajo. Agradezco por el compromiso asumido y la motivación. Así mismo a su Sra. esposa Rocío por sus enseñanzas.

Agradezco al Dr. Luis Miguel Espinosa Rodríguez por sus valiosas aportaciones y sugerencias para la mejora de este documento.

Al Mto. Julio Carbajal Monroy, por brindarme su amistad y por contribuir en la realización de este trabajo por medio de sus consejos, comentarios y sugerencias.

Agradezco por su apoyo a toda mi familia, abuelos, tíos y primos. Gracias también a todos los seres que ya no están físicamente pero que desde lo alto me cuidan.

Agradezco y dedico este trabajo a mis compañeros de generación y a mis amigos: Jorge, Jessica, Miguel, Ramiro, Alejandra, Israel, Yesica, Erick, Chava, Julio, Joel, Jessamyn, Armando.

Al Lic. Ignacio Pichardo Pagaza y a su equipo de trabajo por permitirme formar parte de el y por el apoyo y comprensión brindado para la culminación de esta etapa.





Resumen

La Ciudad de Tijuana se ubica en el límite entre dos placas tectónicas, la Placa del Pacífico y la Placa Norteamericana, esta situación provoca que dicha ciudad sea sísmicamente activa. Aun cuando no hay registros de sismos fuertes al interior de esta zona de estudio, dado el fuerte crecimiento poblacional que presenta, así como la creciente demanda de infraestructura hace necesario identificar las zonas de mayor riesgo.

El presente trabajo está estructurado en cinco capítulos; el primero de ellos aborda el aspecto teórico, tanto retrospectivo como actual referente a la temática de la evaluación del riesgo sísmico desde la perspectiva geográfica. Posteriormente, se presenta la propuesta de metodología desarrollada en esta investigación para cumplir los objetivos, esta incluye aspectos geológico-estructurales, y socioeconómicos, lo cual da a la investigación un enfoque integral. Después se aborda lo referente al aspecto geológico del área de estudio, con lo cual se llega a la obtención de modelos de evaluación de peligrosidad sísmica. En lo subsecuente se trata la temática relacionada con algunas características del sistema social, lo cual da pauta a la evaluación de la vulnerabilidad, tanto estructural como socioeconómica.

A través del uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG en inglés será GIS) se logra la correlación entre las variables evaluadas en las partes anteriores, con lo cual se identifican zonas de alto riesgo, sobre las cuales se realiza un análisis de los elementos expuestos en la zona de estudio que repercuten en cuestión de pérdidas humanas y materiales.

Palabras clave: Tectónica, Riesgo, Peligrosidad, Vulnerabilidad, SIG.





Abstract

Tijuana is located on the boundary between two tectonic plates - the Pacific Plate and the North American Plate and is therefore seismically active. Although no there are records of strong earthquakes within this area of study, rapid population growth and a growing demand for infrastructure make it is necessary to identify the areas of greatest seismic activity and risk.

This research paper is divided into five chapters; the first of which deals with the theoretical side, both retrospective and current in reference to the issue of seismic risk assessment from the geographical perspective. Subsequently, the proposed methodology developed in this research to achieve the objectives is presented. This includes: geological-structural aspects and socioeconomic effects, which makes the paper a comprehensive study. The geological aspect of the study area, lead to the production of models of seismic hazard assessment. Finally, characteristics of the social system are discussed, which provide guidelines for vulnerability assessments for both structural and socioeconomic issues.

Through the use of a Geographic Information System (GIS), a correlation between the variables evaluated in the previous parts, identified high risk areas on which an analysis of the elements exposed issues affecting both human and material losses in the study area.

Keywords: Tectonics, Risk, Hazard, Vulnerability, GIS.





Índice

Introducción.....	12
Localización del área de estudio.....	13
Antecedentes.....	14
Análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas mediante Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la Ciudad de Granada.....	14
HAZUS. <i>FEMA's Methodology for Estimating Potential Losses from Disasters</i>	15
Proyecto RADIUS caso Tijuana	16
Aportes para un escenario sísmico en Tijuana: ¿y si un terremoto de magnitud 6.5 se produjera en la falla de la nación?	18
Planteamiento del problema	20
Justificación	23
Objetivos.....	25
Objetivo general.....	25
Objetivos específicos	25
CAPÍTULO I.....	26
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	26
1.1 Introducción	27
1.2 Orígenes y evolución del estudio de los riesgos en el contexto geográfico.....	27
1.3 Geografía Física.....	29
1.4 Riesgos naturales	30
1.4.1 Peligro o amenaza natural	30
1.4.2 Vulnerabilidad.....	31
1.4.3 Vulnerabilidad física	31
1.4.4 Vulnerabilidad social.....	32
1.4.5 Exposición.....	33
1.5. Riesgos geológicos	33
1.6 Sismo o Terremoto.....	34
1.6.1 Ondas sísmicas.....	35





1.6.1.2 Ondas de Cuerpo	35
1.6.1.3 Ondas de superficie	36
1.6.2 Magnitud de un sismo	39
1.6.2.1 Escala de Magnitud Local M_L	39
1.6.2.2 Escala de Magnitud de Ondas Superficiales M_s	40
1.6.2.3 Escala de Magnitud Momento M_w	40
1.2.6.4 Intensidad de un sismo	41
1.7 Riesgo sísmico	43
1.7.1 Peligrosidad sísmica	43
1.8 Respuesta sísmica del terreno	45
1.8.1 Parámetros geofísicos para estimar la respuesta sísmica del terreno	45
1.8.2 Efecto local o de sitio	46
1.8.3 Período dominante del suelo	47
1.8.4 Velocidad de ondas de corte	47
1.8.5 Aceleración máxima del terreno (<i>Peak Ground Acceleration</i>)	48
1.8.6 Mapas predictivos (Mapas de Isosistas)	48
1.9 Vulnerabilidad sísmica/estructural	49
1.9.1 Dinámica de los sistemas elásticos	50
1.9.2 Resonancia de una estructura	51
1.10 Sistema de Información Geográfica	52
1.10.1 Componentes del SIG	52
1.10.2 Modelos de datos en los SIG's	54
1.10.3 Sistemas de Información Geográfica y Evaluación del Riesgo Sísmico	55
CAPÍTULO II	56
MARCO METODOLÓGICO	56
2.1 Introducción	57
2.2 De los métodos para evaluar el riesgo sísmico	57
Etapa 1. Evaluación de la peligrosidad sísmica	59
Etapa 2. Evaluación de la vulnerabilidad estructural	60





Etapa 2.1 Evaluación y análisis de exposición	62
Etapa 3. Evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica.....	63
Etapa 4. Procesamiento en Sistema de Información Geográfica	67
Etapa 4.1 Aplicación de la plataforma de Sistema de Información Geográfica	69
CAPÍTULO III	73
CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA, GEOTÉCNICA Y EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA.....	73
3.1 Introducción	74
3.2 Geología y sismotectónica del norte de Baja California.....	74
3.3 Geología superficial del área de estudio	75
3.4 Lineamentos geológicos	79
3.5 Fallas activas que pueden afectar a la Ciudad de Tijuana	81
Falla <i>Coronado Bank</i>	81
Falla <i>Rose Canyon</i>	82
Falla <i>Silver Strand</i>	83
Falla San Miguel	84
Falla Calabazas.....	85
Falla Vallecitos.....	85
3.6 Caracterización geotécnica genérica.....	86
Zona Río Tijuana.....	88
Zonta Playas de Tijuana	88
Zona de Otay	88
3.7 Evaluación de peligrosidad sísmica a partir de modelos de intensidades sísmicas	89
CAPÍTULO IV	96
EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SOCIOECONÓMICA Y ESTRUCTURAL ..	96
4.1 Introducción	97
4.2 Vulnerabilidad socioeconómica.....	97
4.3 Vulnerabilidad socioeconómica a nivel de AGEB	102
4.4 Evaluación de vulnerabilidad estructural.....	111





4.5 Análisis de Exposición.....	118
CAPÍTULO V	124
EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL RIESGO SÍSMICO	124
5.1 Introducción	125
5.2 Evaluación del Riesgo Sísmico en la Zona Urbana de Tijuana (peligrosidad basada en intensidades sísmicas).....	125
5.3 Evaluación del Riesgo Sísmico en la Zona Urbana de Tijuana (peligrosidad basada en modelo de respuesta sísmica del terreno)	128
5.4 Análisis del Riesgo Sísmico en la Zona Urbana de Tijuana.....	133
5.5 Riesgo sísmico alto en la Zona Urbana de Tijuana y calidad de las viviendas	134
5.6 Riesgo sísmico en la Zona Urbana de Tijuana y ubicación de líneas vitales (<i>life lines</i>)	138
5.7 Propuesta de medidas de mitigación del riesgo sísmico.....	147
Conclusiones y recomendaciones	150
Referencias	154
ANEXOS	160
ANEXO 1	161
Descripción de estudios geotécnicos realizados en la Zona Urbana de Tijuana.....	161
ANEXO 2	167
Evaluación de la capacidad de respuesta de la Unidad Municipal de Protección Civil.	167





Índice de figuras

Capítulo	Número	Título	Página
	1	Mapa de ubicación del área de estudio	13
	2	Mapa de localización del área de estudio en el contexto sismotectónico regional	21
I	1.1	Mecanismo de un sismo	35
	1.2	Tipos de ondas sísmicas y efectos que producen en los materiales a través de los cuales viajan	38
	1.3	Componentes de un Sistema de Información Geográfica	53
II	2.1	Estructura general del marco metodológico	58
	2.2	Diagrama de flujo de la aplicación de la plataforma de Sistema de Información Geográfica	68
III	3.1	Estructuras geológicas del norte de Baja California	75
	3.2	Mapa geológico de la zona urbana de Tijuana	77
	3.3	Gráfica de la distribución porcentual por tipo de roca en el área urbana de Tijuana	78
	3.4	Mapa de lineamientos geológicos regionales	80
	3.5	Ubicación de estudios geotécnicos en la Ciudad de Tijuana	87
	3.6	Mapa de intensidades sísmicas con probabilidad de presentarse en la zona urbana de Tijuana a partir del rompimiento de la Falla <i>Silver Strand</i> o La Nación.	94
IV	4.1	Gráfica de porcentaje de AGEB's urbanas por grado de vulnerabilidad socioeconómica	102
	4.2	Mapa de vulnerabilidad socioeconómica a nivel de AGEB urbana	104
	4.3	Zona con alta vulnerabilidad socioeconómica. Delegación San Antonio de los Buenos	107
	4.4	Mapa de interpolación de los períodos dominantes del terreno	112
	4.5	Mapa de vulnerabilidad estructural de la zona urbana de Tijuana.	114
	4.6	Zona Río Tijuana (alta vulnerabilidad estructural)	115
	4.7	Desarrollos inmobiliarios construidos en zonas con alta vulnerabilidad estructural.	116
	4.8	Tipo de vivienda común en la Ciudad de Tijuana	117
	4.9	Mapa de exposición de la zona urbana de Tijuana	119





Capítulo	Número	Título	Página
V	5.1	Mapa de riesgo sísmico de la zona urbana de Tijuana. Peligrosidad basada en intensidades sísmicas	126
	5.2	Mapa de riesgo sísmico en la zona urbana de Tijuana. Peligrosidad basada en la respuesta sísmica del terreno	130
	5.3	Gráfica de porcentaje de territorio con riesgo alto por cada delegación municipal	131
	5.4	Análisis de riesgo sísmico mediante la distribución de la calidad de las estructuras y los niveles de riesgo altos	136
	5.5	Mapa de análisis de riesgo sísmico y ubicación de albergues, estaciones de bomberos y gasolineras	140
	5.6	Gráfica de número de estructuras críticas por delegación	141

Índice de tablas

Capítulo	Número	Título	Página
I	1.1	Aparición y evolución de las teorías sobre riesgos en el contexto geográfico	28
	1.2	Escala de Magnitud Local	40
	1.3	Escala de Intensidad de Mercalli Modificada	42
II	2.1	Indicadores considerados para el rubro de salud	64
	2.2	Indicadores considerados para el rubro de educación	64
	2.3	Indicadores considerados para el rubro de vivienda	65
	2.4	Indicadores considerados para el rubro de empleo e ingresos	66
	2.5	Indicadores considerados para el rubro de población	66
IV	4.1	Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro de salud a nivel de zona urbana	99
	4.2	Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro de educación a nivel de zona urbana	100
	4.3	Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro de vivienda a nivel de zona urbana	100
	4.4	Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro de empleo e ingresos a nivel de zona urbana	101
	4.5	Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro de población a nivel de zona urbana	101
	4.6	Resultado promedio de los indicadores por cada rubro de la metodología en AGEB's con alto grado de vulnerabilidad socioeconómica	105
	4.7	Resultado promedio de los indicadores por cada rubro de la metodología en AGEB's con grado medio de vulnerabilidad socioeconómica	108





Capítulo	Número	Título	Página
IV	4.8	Resultado promedio de los indicadores por cada rubro de la metodología en AGEB's con grado bajo de vulnerabilidad socioeconómica	110
	4.9	Zonas con alto grado de vulnerabilidad estructural y su relación con las características geotécnicas	113
V	5.1	Matriz de integración de variables para el análisis del riesgo sísmico	145





Introducción

Desde el punto de vista de la ciencia geográfica, la evaluación de los riesgos naturales debe ser abordada desde un enfoque integrador, el cual permita el estudio de los procesos naturales que representan un peligro y que, mediante las interrelaciones con el sistema social pueden generar escenarios de riesgo.

Tal como plantea Keller (2004), uno de los principios en el estudio de los riesgos naturales es que el aumento de la población intensifica el efecto del riesgo, de tal manera que la creciente demanda de espacios para uso habitacional ha provocado que el hombre se asiente en áreas expuestas a algún peligro natural, convirtiendo éstas en zonas de riesgo. En el presente trabajo se analiza el proceso de creación de este tipo de zonas a causa de un peligro natural como son los sismos y la actuación de la población en dichos espacios.

El universo de estudio está referido al Área Urbana de Tijuana, Baja California, en la cual, a pesar de saber que el riesgo por la ocurrencia de un terremoto es alto por el hecho de localizarse en una región activa desde el punto de vista sísmico, es necesario conocer aquellas zonas que por sus condiciones geológicas y socioeconómicas son más vulnerables ante este proceso natural.

Durante el desarrollo de esta investigación será posible observar las principales características geológicas del área de estudio, además de propiedades geotécnicas de algunos sitios específicos, que en conjunto darán como resultado el análisis de la peligrosidad sísmica del área de interés. En etapas posteriores, se analizarán las condiciones de vulnerabilidad, tanto socioeconómica como estructural, las cuales representan el segundo componente del estudio del riesgo.

Durante el desarrollo de la investigación se utilizará una plataforma de sistema de información geográfica, el cual como herramienta tecnológica permite realizar distintos tipos de análisis sobre procesos espaciales. El trabajo culmina con la identificación y análisis de las zonas de riesgo obtenidas como resultado de las etapas anteriores.





Localización del área de estudio.

El área de estudio corresponde a la Zona Urbana del Municipio de Tijuana, se encuentra ubicada al noroeste del Estado de Baja California con una superficie aproximada de 238.82 km². Las coordenadas geográficas extremas del área son las siguientes:

Latitud máxima: 32° 32' 02.4" N

Latitud mínima: 32° 28' 30" N

Longitud máxima: 117° 07' 22.8" W

Longitud mínima: 116° 49' 40.79" W

Colinda al norte con el condado de San Diego, al este con el municipio de Tecate, al sur con los municipios de Ensenada y Playas de Rosarito y al oeste con el Océano Pacífico. La totalidad del territorio del área de estudio se ubica en la Provincia Fisiográfica de la Península de Baja California y en la Subprovincia Sierras de Baja California Norte.

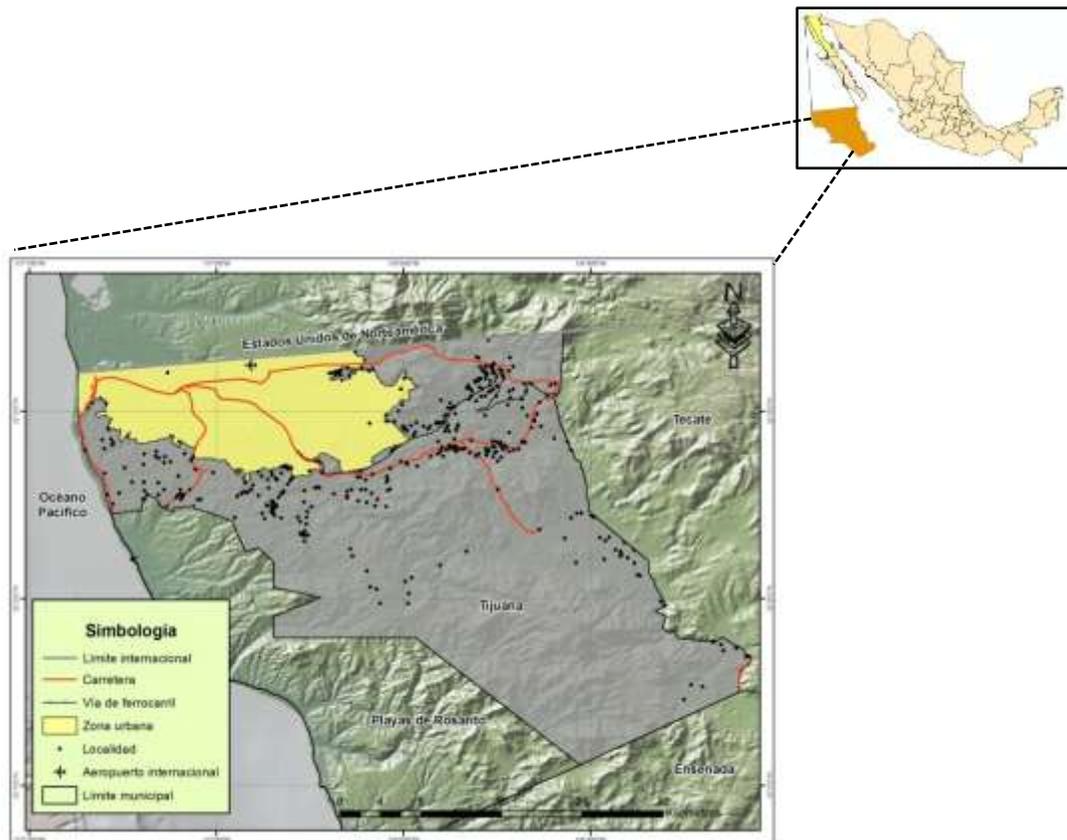


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.





Antecedentes

En este apartado se hablará sobre algunos proyectos y trabajos de investigación referentes a la temática que el presente trabajo aborda; cabe mencionar que durante la revisión de estos antecedentes se ha observado que el uso de las tecnologías de la información geográfica es cada vez más recurrente en esta temática, puesto que ha resultado una herramienta de utilidad en el manejo y procesamiento de la información.

En lo sucesivo se hablará de las investigaciones realizadas en el plano internacional así como también de aquellas que se han desarrollado de manera local, con mayor énfasis en dos proyectos de investigación que han sido un parteaguas en el estudio del riesgo sísmico en el área de estudio.

Análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas mediante Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la Ciudad de Granada

En el año 2006 Iglesias *et al* presentan una metodología que consideran sencilla para hacer la evaluación del riesgo sísmico mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG); en primer lugar, retoman una microzonación geotécnica realizada por Cheddadi (2001), a la cual se le aplica el método de interpolación geoestadística *kriging*. El uso de este método geoestadístico fue justificado en razón de que era necesario realizar una interpolación de los datos discretos procedentes del mapa original, construyendo una información espacial continua que eliminara los vacíos de información que éste presentaba. Además, después de probar en el SIG distintos modelos de *kriging* (ordinario, universal), comprobaron que era el que respetaba de manera fiel la microzonación original, así mismo también resultaba más acorde con la cartografía geotécnica con la que se había contrastado la microzonación de Cheddadi. La microzonación, expresa la respuesta del terreno ante un evento sísmico, en base las frecuencias de llegada de los trenes de ondas sísmicas, geotecnia, piezometría y efectos secundarios.

Para determinar los elementos en riesgo, los autores, solo toman en cuenta el número de edificios y el número de personas, dejan para un estudio en mayor profundidad, la determinación de elementos en riesgo tales como las líneas vitales o *life lines* es decir;





carreteras, líneas férreas, eléctricas, telefónicas, abastecimiento de agua, o bien edificios que por su singularidad merecen una atención específica como, hospitales, cuarteles, centros administrativos y docentes.

La metodología que se plantea permite una evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica en la edificación, teniendo en cuenta los factores que la controlan:

- Estructura
- Cimentación
- Altura (resonancia)
- Respuesta sísmica del terreno (microzonación)

Las variables estructura y cimentación se agrupan en un solo factor que los autores llaman “calidad en la edificación”, para ello clasifican los datos referentes a la fecha de construcción de los edificios, en cuatro períodos de tiempo, el primero anterior a 1950, desde 1950 hasta 1974, de 1975 a 1995 y posterior a 1996, esta división temporal está dada en función de las reformas y creaciones de nuevas normas sismorresistentes europeas. A partir de estos datos se elabora una matriz alfanumérica que permite relacionar, de forma genérica, la edad de las edificaciones con su tipo de estructura y cimentación, utilizando este criterio se han integrado los datos en el SIG, lo que permitió representar de manera cartográfica la calidad de las viviendas.

En conclusión, la determinación de la vulnerabilidad se realizó por medio de dos variables principales, la calidad de la edificación y la microzonación sísmica, relacionados por medio de una matriz.

HAZUS. FEMA's Methodology for Estimating Potential Losses from Disasters.

Una de las etapas en el estudio de los riesgos naturales está referida a la gestión. El *U.S. Department of Homeland Security*, ha desarrollado una metodología estandarizada a nivel nacional de aplicación que contiene los modelos para estimar las pérdidas potenciales de terremotos, inundaciones y huracanes. *HAZUS* utiliza como base un SIG para estimar los impactos físicos, económicos y sociales de los desastres. Se ilustran gráficamente los





límites de determinadas ubicaciones de alto riesgo debido a terremotos, huracanes y las inundaciones.

Los usuarios pueden visualizar las relaciones espaciales entre las poblaciones y otros activos fijos o de manera más permanente de recursos para el riesgo específico que se está modelando, una función crucial en el proceso de planificación antes de los desastres. *HAZUS* se puede utilizar en la etapa de evaluación, en la planificación de la mitigación de procesos, que es la base para la estrategia a largo plazo de la comunidad para reducir las pérdidas por desastres y romper el ciclo de los daños causados por desastres, la reconstrucción, y el daño repetido.

Proyecto *RADIUS* caso Tijuana

En el contexto nacional, uno de los estudios de mayor trascendencia en el área de estudio surge a raíz de que las Naciones Unidas designó a partir de 1990, la “Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales” (IDNR). En 1994, posterior al terremoto de Kobe, la Conferencia Mundial sobre Reducción de Desastres Naturales se llevó a cabo en Yokohama Japón, a partir de la cual, en 1996, se lanzó a nivel mundial el proyecto *RADIUS*, el cual fomenta el promover actividades para la reducción de desastres sísmicos en áreas urbanas de países en desarrollo.

Dicho proyecto fue realizado en Tijuana durante el período de 1998 a 1999 y uno de los objetivos principales fue la estimación del riesgo sísmico de la ciudad, a través de un escenario de daños creado por la ocurrencia de un terremoto hipotético.

El desarrollo del trabajo parte de la evaluación de la peligrosidad sísmica, la cual se obtuvo mediante la estimación de los valores de intensidades sísmicas, a través de un modelo teórico que supone la ocurrencia de un sismo hipotético. Los valores resultantes de intensidades sísmicas van desde VI hasta IX, según la escala de Mercalli.

Las curvas de valores de intensidades sísmicas utilizadas para el escenario de daños físicos fueron obtenidas del trabajo de Acosta y Montalvo (1998). Este trabajo supone la ocurrencia de un terremoto en la falla La Nación (localizada 5 Km. al norte de Tijuana, en





E.U.A.), de magnitud 6.5. Con lo anterior se elaboró un mapa intensidades sísmicas hipotéticas, el cual fue tomado como la base sobre la cual se sobrepusieron otros productos cartográficos que se realizaron y que fueron útiles para la determinación de daños colaterales, como es el caso de, la ubicación de infraestructura hidráulica, escuelas, aeropuertos, bomberos, hospitales, estaciones de policía y gasolineras, además de otros mapas referentes a información geotécnica y de sismicidad histórica.

La etapa posterior consistió en la evaluación de la vulnerabilidad. El proyecto pone especial énfasis en la resistencia de edificaciones antes eventos sísmicos; dado que Tijuana para ese año no contaba con funciones de vulnerabilidad sísmica propias, para la estimación de daños por sismo, fueron revisadas las funciones desarrolladas en otras ciudades con materiales y tipos de construcción habitacional y de servicios públicos similares. Para la estimación de daños a edificaciones en Tijuana se utilizaron las funciones del Proyecto de Manejo de Riesgo por Terremoto de Quito, Ecuador y según el reporte, para la estimación de daños a viviendas se realizó una estimación primaria, la cual considera tres tipos generalizados de construcciones típicas de Tijuana:

- 1) Edificaciones de concreto reforzado, con buena calidad y diseño, supervisión ingenieril y asistencia profesional.
- 2) Edificaciones de concreto no reforzado o ladrillo de calidad intermedia y sin supervisión ingenieril ni asistencia profesional (autoconstrucción semi-formal).
- 3) Edificaciones de otros materiales (madera, derivados) de autoconstrucción informal.

La zonificación de estos 3 tipos fue realizada a nivel de colonias, con un promedio generalizado para cada colonia, para tener la posibilidad de utilizar un Sistema Información Geográfica. A un total de 641 colonias existentes en Tijuana, se le asignó uno de los 3 tipos y un factor central de daño dependiente de su ubicación con respecto a la zona de intensidad sísmica correspondiente, lo anterior dio como resultado un mapa de riesgo sísmico a nivel de colonia.





Aportes para un escenario sísmico en Tijuana: ¿y si un terremoto de magnitud 6.5 se produjera en la falla de la nación?

Otro de los proyectos realizados en el contexto local y que mantiene estrecha relación con el anterior descrito, fue realizado en el año 2000, cuando el Colegio de la Frontera Norte (COLEF) publicó el libro titulado “Aportes para un escenario sísmico en Tijuana: ¿y si un terremoto de magnitud 6.5 se produjera en la Falla de la Nación?”, en el cual se modela el posible escenario que se presentaría si ocurriera un sismo de magnitud 6.5. En este trabajo se utilizan como base las curvas de valores de intensidades sísmicas utilizadas para el escenario de daños físicos del trabajo de Acosta y Montalvo (1997) en el Departamento de Sismología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, a partir del rompimiento propuesto para esta falla, expresados en un mapa de intensidades esperadas de Mercalli para la región de Tijuana.

Para evaluar la peligrosidad sísmica Acosta y Montalvo propusieron un sismo de magnitud 6.5, dadas las características de la falla y utilizaron ecuaciones empíricas predictivas apropiadas para la región, además, incluyeron los efectos de sitio en función de los tipos de suelos.

La vulnerabilidad socioeconómica se estimó con datos del Censo de Población y Vivienda de 1995 del INEGI. Estos datos están referidos al nivel de AGEB (Área Geoestadística Básica). Se aplicó una metodología desarrollada en el SIGEF (Winckell A., LePage M., 1997) con la cual se logró modelar la repartición de la población a nivel de manzana urbana, tomando en cuenta, entre otros factores, la superficie real ocupada, el tipo de uso del suelo y la densidad de habitantes según el tipo de viviendas con su número de pisos. Una agregación espacial posterior permitió entregar esta estimación de población a nivel de colonia, la cual es una entidad espacial conocida y utilizada de manera común en la administración pública.

Para evaluar la vulnerabilidad estructural y en ausencia de un estudio geotécnico o de ingeniería civil, se decidió trabajar con una capa de información del SIG (Proyecto Cuenca del Río Tijuana, COLEFSDSU, 1997), el cual diferencia niveles en la calidad de la





vivienda en Tijuana. Se modificó esta clasificación adaptándola según los tipos de construcción descritos en la escala de Mercalli, con el objeto de estimar el comportamiento supuesto de los edificios ante el sismo (COLEF *et al*, 2000).

Una vez revisados los anteriores trabajos, se han podido identificar varios aspectos de trascendencia para esta investigación; desde la perspectiva teórica, resalta la idea y se converge con ella cuando Iglesias *et al* (2006) señala que, el análisis de riesgo sísmico en zonas urbanas ha carecido de manera tradicional de estudios que lo aborden de forma integral, puesto que en ocasiones solo se consideran aspectos relacionados con la calidad de las construcciones o bien solo se estudia a la peligrosidad. El mismo autor señala que tal integralidad se puede lograr mediante el uso de una herramienta como el SIG, lo cual es una de las propuestas del presente trabajo.

Otro aspecto que se ha observado de manera constante en todas las investigaciones es la necesidad de poseer información de carácter geotécnico, puesto que los autores consideran que esta es determinante a la hora evaluar la peligrosidad del evento sísmico. No obstante, incluso en los estudios locales, se observa que dicha información ha sido sustituida de manera definitiva por los modelos predictivos de intensidades sísmicas. De lo anterior se refuerza la idea de que en el presente trabajo se debe utilizar información de carácter geotécnico que permita conocer la respuesta sísmica del terreno.

En el ámbito metodológico existe convergencia entre la mayoría de los autores, puesto que de inicio plantean evaluar la peligrosidad sísmica, aunque sea por diferentes vías, después proponen realizar la evaluación de la vulnerabilidad, no obstante, en la mayoría de los casos esta variable es referida a aspectos estructurales e ingenieriles. Hasta esta parte se puede considerar en acuerdo para el caso de este trabajo, puesto que las anteriores variables también se estarán considerando, sin embargo, ninguno de los trabajos propone realizar la evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica, a excepción de los dos estudios locales que solo consideran a la población, pero como un elemento de exposición. Esta variable está considerada a desarrollarse en el presente trabajo. El uso del SIG es otro factor en el ámbito metodológico del cual se encuentra convergencia y acuerdo, al considerarse como la herramienta principal para el manejo de la información.





Planteamiento del problema

México es uno de los países que cuenta con más regiones activas desde el punto de vista sísmico. Desde el norte, partiendo de la Región de Baja California, hasta el sur del territorio nacional, en las costas del Estado de Chiapas, es posible encontrar registros sobre eventos de esta naturaleza. Esto de inmediato hace pensar que estamos frente a un peligro inminente.

Aunado a la presencia de este peligro natural, también es posible observar diferentes condiciones de vida en todo el territorio, además de la falta de una cultura de prevención en la mayoría de los casos. Si se conjugan los dos factores antes mencionados, se hace necesario hablar de la presencia de un riesgo, lo cual se vuelve más complejo en la medida en que el peligro natural aumenta su magnitud y las condiciones socioeconómicas, es decir la vulnerabilidad también aumenta.

En el área de estudio que ocupa a esta investigación, la presencia del peligro y las condiciones de vulnerabilidad, se acentúan de manera considerable, ya que, al ser una ciudad que se sitúa en la frontera activa de dos placas tectónicas, la del Pacífico y la Norteamericana (Figura 2), además de las condiciones socioeconómicas, las cuales pueden ser cambiantes de un sitio a otro, el nivel de riesgo al que se encuentra sometida es en cierta medida alto. Lo anterior se ve reforzado por la ocurrencia en el 2010 de un temblor en Mexicali que alcanzó una magnitud M_w 7.2, el cual fue sentido con una intensidad considerable en la Ciudad de Tijuana (Huerta, 2011). A partir de lo anterior, cobra importancia la realización de un estudio de riesgo sísmico, visto desde un enfoque geográfico, el cual permita la interrelación de variables tanto naturales como sociales, que en conjunto con una herramienta con un Sistema de Información Geográfica de como resultado el conocimiento de la localización, causalidad y distribución de zonas de riesgo.



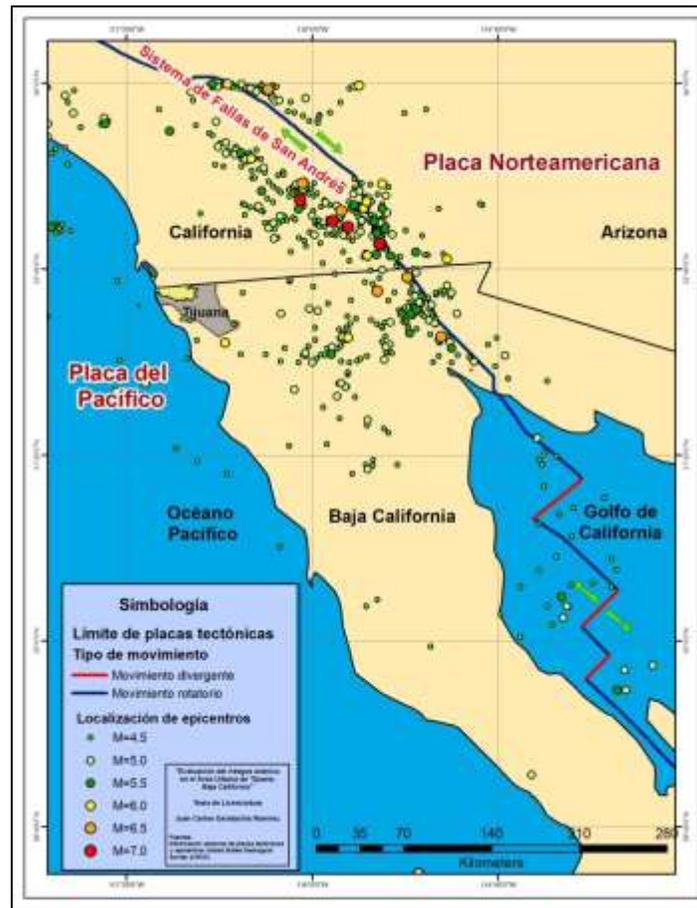


Figura 2. Mapa de localización del área de estudio en el contexto sismotectónico regional.

Hablar de riesgo sísmico no solo representa saber qué tan probable es que ocurra un terremoto que cause daños a la sociedad y su entorno, también implica un proceso de evaluación integral de todos los elementos presentes en el sistema que se puede ver afectado, es decir, es necesario conocer tanto la parte geotécnica o geofísica de los materiales sobre los cuales se sitúa dicho lugar para estimar las peligrosidad del proceso, así como las condiciones de vulnerabilidad social y estructural, además de los elementos que se encuentran expuestos ante la ocurrencia del peligro. El lugar sobre el que se plantea trabajar, ha sido objeto de varios estudios referentes al tema, pero con enfoques ingenieriles, dicho de otra manera, se han dedicado más investigaciones dirigidas al resguardo de infraestructura mediante el estudio y evaluación de resistencia de las edificaciones, y no tanto a una integración y relación de esa información para una posterior





representación espacial de todos aquellos elementos expuestos ante un evento de esa naturaleza.

Es importante resaltar el carácter multidisciplinar que posee el estudio de los riesgos, en el campo geográfico, el estudio tanto de los procesos naturales como de la vulnerabilidad, establece un punto de convergencia de las diferentes áreas afines a este tipo de estudios. Por consiguiente, la propuesta planteada, asume que no existen los suficientes productos informativos-cartográficos que den muestra de los posibles niveles de riesgo sísmico en el área de estudio, pero la escases de dichos productos no ha sido ocasionada por falta de información o interés; una primera aproximación a la causa de lo anterior radica en que, profesionales del territorio no han incursionado de forma considerable en el tema de riesgo sísmico, aun cuando la geografía es la primera ciencia que se preocupó por la presencia de riesgos naturales, y siendo México, uno de los países con mayor ocurrencia de sismos.

Como ya se ha mencionado en párrafos anteriores, en el presente trabajo se propone de analizar el riesgo sísmico en el área de estudio, mediante una plataforma de sistema de información geográfica, pero además, con la aplicación de los principios de la geografía, que en definitiva, son los que dan lugar a la presencia de los procesos que modelan el espacio geográfico.

Cabe mencionar que la efectividad de los resultados no está determinada por el uso del SIG, puesto que este solo será la herramienta que permita llegar a ellos, sin embargo los criterios que se proponen emplear, así como el tipo de información que se utilizará, permitirá el logro de los objetivos planteados para este trabajo, de los cuales se hablará más adelante.





Justificación

En la actualidad resulta difícil encontrar trabajos de investigación sobre la temática de riesgo sísmico que se hayan realizado desde una perspectiva integral, lo anterior coincide con lo que plantea Iglesias *et al.* (2006) “El análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas ha carecido tradicionalmente de estudios que lo abordaran de forma integral”. Las investigaciones más comunes son abordadas desde el punto de vista ingenieril, “...solo se consideran los aspectos relacionados con la calidad en la edificación sin tener en cuenta el efecto de sitio, o bien solo se estudia la peligrosidad. La evaluación del riesgo debe abordar, además de la estimación de las sismicidad y el efecto de su amplificación y atenuación, la vulnerabilidad de los elementos expuestos”.

En nuestro país, la planificación territorial es uno de los aspectos que apenas comienzan a considerarse por las administraciones de gobierno; la evaluación de riesgos, en especial la de riesgo sísmico, en un territorio con alto grado de vulnerabilidad ante estos procesos, es un instrumento de planeación y aún más de prevención, muy útil al momento de tomar decisiones sobre los usos del territorio. Aunado a lo anterior, este tipo de estudios, permiten la adopción de medidas no estructurales, las cuales son las más eficaces, pero que también, es importante mencionar, son estas medidas las que generan menos inversión de recursos, en comparación de las medidas estructurales, que implican realizar acciones sobre bienes materiales.

Para el caso del área de estudio, la dinámica poblacional, más que la dinámica del proceso natural, avanza con una velocidad digna de considerar, ya que al ser una zona fronteriza con los Estados Unidos de Norteamérica, los procesos migratorios aumentan, y al ser pocas o en ocasiones nulas las posibilidades de ingresar al país vecino, la presencia de asentamientos irregulares son cada vez más frecuentes; aunado a lo anterior, se conjuga la dinámica demográfica propia del lugar, por ejemplo, para el año 2010, el área de estudio registra 32,014 nacimientos, un poco más del 50 % del total de todo el estado con 63,559.

Como se puede observar en los antecedentes de esta investigación, próximo al año 2000, en Tijuana, Baja California, se realizaron dos investigaciones casi llevadas a cabo a la par





sobre riesgo sísmico, sin embargo, dichos trabajos utilizaron datos del conteo de población de 1995, para entonces el municipio contaba con 991,592 habitantes, según el Instituto Nacional de Geografía y Estadística, en la actualidad, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010, en Tijuana habitan 1'559,683 personas, con una diferencia de más de 500,000 habitantes en un período de solo 5 años, es interesante y de relevancia para el área realizar un estudio de riesgo sísmico, puesto que además hay que considerar que esa población no aumentó en los mismos lugares, sino que hubo una configuración espacial diferente, tampoco se tiene la certeza de saber si esa población se movió hacia zonas de mayor riesgo o hacia zonas más seguras.

Ésta investigación se ve reforzada con lo antes citado, ya que el uso de las tecnologías de información, como es el caso de los Sistemas de Información Geográfica, permiten reunir y analizar variables necesarias para el estudio de riesgos, las cuales son la peligrosidad, que estaría representada por las características geológicas y geotécnicas de los materiales sobre los cuales se sitúa el área de estudio, la vulnerabilidad, que son las condiciones tanto sociales como estructurales que se encuentran expuestas ante el peligro sísmico.

Ya se ha mencionado el porqué de la realización de este proyecto, visto desde la perspectiva del impacto que puede tener en la sociedad, pero desde otro punto de vista, es importante para la disciplina geográfica incursionar en estas temáticas, ya que permiten la interacción y llevar a la práctica actividades de multidisciplinariedad.

Si bien ya se ha resaltado la importancia del uso de las nuevas tecnologías y la aplicación de la geografía a este tipo de temáticas, es pertinente mencionar que se deben considerar las proporciones en cuestión de conocimientos y tiempo como limitantes, sin embargo se considera que es posible realizar este estudio desde esta perspectiva.





Objetivos

Objetivo general.

Evaluar los distintos niveles de riesgo sísmico en el Área Urbana Tijuana, Baja California, haciendo uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica.

Objetivos específicos

- 1) Realizar una caracterización geológica, geotécnica y evaluación de peligrosidad sísmica.
- 2) Evaluar las condiciones de vulnerabilidad socioeconómica y estructural.
- 3) Procesar en una plataforma de Sistema de Información Geográfica la información resultante de los productos anteriores, para obtener cartografía de los niveles de riesgo sísmico en la zona de estudio.





CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL





1.1 Introducción

En el presente capítulo se abordan aspectos relacionados con la teoría que da sustento al presente trabajo, así mismo, se describen a manera de conceptos, aquellos elementos y factores que determinan el riesgo; se parte de un breve remembranza cronológica de las teorías geográficas del riesgo y se llega a la descripción específica de los elementos y variables del riesgo sísmico.

1.2 Orígenes y evolución del estudio de los riesgos en el contexto geográfico

Según Martínez (2009), a partir de las obras griegas de la antigüedad y hasta el renacimiento se distinguen tres enfoques relativos al estudio de los riesgos, el primero de estos, trata de explicar los orígenes del planeta y las causas físicas de los fenómenos terrestres pero excluye al aspecto humano. El segundo es un enfoque teológico, en el cual se ve a los procesos naturales como castigos divinos, mientras que el tercero busca hacer una descripción de los fenómenos terrestres y de los habitantes.

El siguiente cuadro muestra los aportes de distintos autores en diferentes temporalidades, referentes al estudio de los riesgos naturales desde el campo de la geografía.





Autor y temporalidad	Aporte y/o propuesta
Homero, (siglo IX a.C.)	En sus obras <i>La Iliada</i> y <i>La Odisea</i> se ilustró sobre los lugares, sus peligros y las gentes.
Hecateo de Mileto (476 a.C.)	En su obra describe el clima, el territorio y sus peligros como volcanes en erupción y montañas destruyéndose.
Estrabón (21 d.C)	Describió algunas catástrofes relatadas en los trabajos de viajeros y filósofos, su obra perduró hasta el período medieval.
Antonio de Ulloa y Jorge Juan (1742)	En su estudio <i>Relación histórica del viaje a la América Meridional</i> , exponen que los terremotos están directamente relacionados con las erupciones volcánicas.
J. Milne (siglo XIX)	Inventa sismógrafos. Los geógrafos asumen el estudio científico de los sismos.
Montessus de Ballore (siglo XIX)	Publica en Japón el primer tratado de <i>Geografía Sismológica</i> donde aparecen todas las regiones sísmicas del mundo.
Maller (principios del siglo XX)	Diseñó el primer mapa de isosistas, titulado <i>Seismic Map, with wave paths and isoseismical curves</i> .
Harlan Barrows (1923)	Define a la geografía como “ecología humana”. Hace hincapié en las relaciones del hombre con el medio natural.
Gilbert White (1945)	Considerado como el “padre” del enfoque ambientalista del análisis de los riesgos por la creación de un paradigma referido a la forma en cómo el ser humano se enfrenta al riesgo.

Tabla 1.1. Aparición y evolución de las teorías sobre riesgos en el contexto geográfico.

Las aportaciones de la ciencia geográfica a los estudios de riesgo han sido de diversos tipos, vistos desde el punto de vista físico, social y sistémico; el primero de estos, de acuerdo con Martínez (2009), han sido realizados a través del trabajo científico basado en experiencias, análisis y explicaciones, con lo cual han propuesto procedimientos y teorías, mientras que los estudios sociales buscan la comprensión de las condiciones sociales y culturales, así mismo, van enfocados a la educación y actuación ante los riesgos. Los estudios sistémicos son dirigidos hacia la explicación de los sistemas ambientales y humanos y buscan la proyección de escenarios. Este último enfoque ha cobrado fuerza a partir de que en 1976 Bertalanffy plateara la Teoría General de Sistemas para el estudio de los procesos terrestres, y es dicha teoría la que en la actualidad permite realizar estudios de riesgo de una manera integral, puesto que considera a cada uno de los elementos de este como subsistemas y el análisis de sus interrelaciones da pauta a la multidisciplinariedad puesto que su enfoque es complementario en aras de lograr la integralidad.

Como se puede observar en la Tabla 1, es Gilbert White con su innovador paradigma quien sienta las bases para abordar la temática de los riesgos naturales de manera integral, al





considerar tanto al proceso natural visto como peligro o amenaza, así como también a la sociedad en su condición de vulnerabilidad. De lo anterior surgen conceptos básicos en el área de los riesgos que se definen en lo subsecuente de este apartado, no sin antes hablar sobre la geografía física, misma que tiene aportes fundamentales en este contexto.

1.3 Geografía Física

Sin duda, el aporte fundamental de la ciencia geográfica al estudio de los riesgos naturales radica en el campo de la geografía física, la cual según Strahler (1982), aunque no constituye por sí misma una rama diferenciada de la ciencia, es un conjunto de principios básicos de las ciencias naturales, seleccionados de forma que incluyan las influencias ambientales, que varían de un lugar a otro en la superficie terrestre. Este autor plantea la conformación de la geografía física mediante la relación de cada una de las ramas de la geografía física con las actividades del hombre en espacios y tiempos específicos.

Según las definiciones clásicas de la geografía, se refieren a ella como la disciplina que trata de la Tierra como morada de la humanidad, del medio físico y de las interacciones entre éste y la sociedad, de la organización espacial que todo ello comporta. Abarca pues el ámbito natural y el ámbito social (Sala y Batalla, 1999).

Para De Martonne (1925) la Geografía Física comprende tres elementos, atmósfera, hidrósfera, litósfera. Tanto o más que de estas propiedades debe ocuparse de las relaciones que resultan de ellas en la superficie de la tierra, dominio propio del geógrafo.

Desde una perspectiva actual, la geografía física ha resuelto los problemas que resultan al tratar de dividir a la geografía humana y la geografía física, y lo ha hecho cuando ha dejado los estudios históricos por los estudios de procesos, estos la han conducido al estudio medio ambiental (Sala y Batalla, 1999). Autores como Goudie (1994) señalan como temas centrales de la geografía física: la descripción y comprensión de los paisajes, la diversidad regional y la sensibilidad ambiental; la identificación de fluctuaciones ambientales; los humanos como agentes del cambio ambiental pasado, presente y futuro; las interrelaciones entre procesos humanos y naturales, el medio ambiente como riesgo; el determinismo ambiental; la utilidad y aplicación de las aptitudes geográficas.





1.4 Riesgos naturales

En este apartado se abordan los conceptos básicos de los estudios de los riesgos, comenzando por la definición misma de estos, seguido de la conceptualización de sus elementos, peligrosidad, vulnerabilidad y exposición.

Una definición sencilla de riesgo natural es la que proponen Burton y Kates (1964) citados por Calvo (1984) quienes los consideran como aquellos elementos del medio físico y biológico nocivos para el hombre y causados por fuerzas ajenas a él. En desacuerdo con esta definición, el autor propone que, desde el punto de vista geográfico, riesgo es la situación concreta en el tiempo de un determinado grupo humano frente a las condiciones de su medio.

Ayala-Carcedo y Olcina (2002), definen el riesgo natural como la posibilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita pueda verse afectado por un fenómeno natural de rango extraordinario. Visto desde el enfoque del territorio, los mismos autores señalan que, el riesgo es la plasmación territorial de una actuación humana poco acorde con los rasgos del medio donde tienen lugar, en otras palabras, es una infracción que el hombre comete sobre el territorio por la implantación inadecuada de actividades o asentamientos. Desde un enfoque social, el riesgo se plantea como el grado de aceptación de la peligrosidad natural por un grupo humano.

Existen definiciones que tienden a encaminar el concepto de riesgo hacia la descripción de sus componentes, como es el caso de Keller (2004), quien propone que un riesgo natural, es cualquier proceso natural que representa una amenaza para la vida humana o la propiedad. Pero además aclara que el suceso en sí no es un riesgo; más bien un proceso natural se convierte en un riesgo cuando amenaza los intereses humanos.

1.4.1 Peligro o amenaza natural

En este apartado se encuentran conceptos referentes al primer componente del riesgo, el cual está representado por el peligro o amenaza natural y es la razón de ser de los estudios de riesgo.





Una definición sencilla de este componente del riesgo es la que propone el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED, 2006) al referirse al peligro como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto período de tiempo y en un sitio dado.

Keller (2004) señala que los procesos naturales de la Tierra se convierten en peligros cuando las personas viven o trabajan cerca de estos procesos y cuando los cambios en la utilización del suelo tales como urbanización o deforestación amplían su efecto.

Según Ayala-Carcedo y Olcina (2002), peligro o amenaza es el proceso o fenómeno de carácter natural o tecnológico que puede ocasionar daños a la población, los bienes materiales o el medio ambiente natural. Según los mismos autores, puede definirse como el conjunto de los aspectos naturales, no sociales, de un fenómeno que tiene incidencia en el riesgo, el daño esperado. Tiene dos componentes estrechamente relacionados, la severidad a menudo caracterizada como intensidad a través de algún parámetro o índice y la probabilidad.

1.4.2 Vulnerabilidad

El CENAPRED (2006) indica que a vulnerabilidad se define 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. En términos generales pueden distinguirse dos tipos: la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social.

Se define como el tanto por uno de pérdida esperable de un determinado bien expuesto, que pueda expresarse determinística o probabilística, siendo 0 para ausencia de daño y 1 para daño o pérdida total. Puede tratarse de vulnerabilidad humana, estructural, económica o ecológica, de acuerdo con el tipo de riesgo a evaluar (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002).

1.4.3 Vulnerabilidad física

Esta variable se complementa en el apartado donde se aborda el concepto de vulnerabilidad estructural, puesto que en el ámbito del riesgo sísmico, este tipo de vulnerabilidad suele





estar referida a las edificaciones. No obstante se pueden observar los siguientes conceptos generales.

Para realizar la cuantificación de la vulnerabilidad física, Flores *et al* (2006), plantea que se utilizan funciones del mismo nombre, es decir, expresiones matemáticas que tratan de establecer una relación entre el nivel del parámetro o variable considerada para representar la intensidad del fenómeno que representa el peligro y la probabilidad de que se presente daño.

Esta definición converge con la propuesta por el anterior autor, puesto que considera a la vulnerabilidad física como una probabilidad de daño de un sistema expuesto y es normal expresarla a través de una función matemática o matriz de vulnerabilidad con valores entre cero y uno. Cero implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y uno, implica que este daño es igual al valor del bien expuesto. De dos bienes expuestos uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, sufre mayores daños (CENAPRED, 2006).

1.4.4 Vulnerabilidad social

García *et al* (2006), en un primer acercamiento menciona que la vulnerabilidad social es una consecuencia directa del empobrecimiento, el incremento demográfico y de la urbanización acelerada sin planeación. En el ámbito de los riesgos la define como una serie de factores económicos, sociales y culturales que determinan el grado en el que un grupo social está capacitado para la atención de la emergencia, su rehabilitación y recuperación frente a un desastre.

Un análisis diferente sobre este concepto es el que realiza la Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL, 2001), quienes señalan que esta tiene dos componentes explicativos. Por una parte, la inseguridad e indefensión que experimentan las comunidades, familias e individuos en sus condiciones de vida a consecuencia del impacto por algún tipo de evento económico-social de carácter traumático. Mientras que por otra parte, esta misma institución define a la vulnerabilidad social como el diseño de estrategias





que realiza la población para hacer frente a los riesgos que se pueden presentar tanto en la comunidad con a nivel familiar.

También se define a la vulnerabilidad como el conjunto de características sociales y económicas de la población que limita la capacidad de desarrollo de la sociedad; en conjunto con la capacidad de prevención y respuesta de la misma frente a un fenómeno y la percepción local del riesgo de la población (García *et al*, 2006).

1.4.5 Exposición

De acuerdo al CENAPRED (2006), La Exposición o Grado de Exposición se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero. En ocasiones pueden emplearse valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o inclusive el número de personas que son susceptibles a verse afectadas.

Según Ayala-Carcedo y Olcina (2002), puede definirse como el conjunto de personas, bienes, servicios y proceso expuestos a la acción de un peligro. Puede distinguirse según su naturaleza, la humana, la económica y la ecológica. Puede estar compuesta por realidades tan diferentes como transeúntes, residentes, cantidades de dinero, instalaciones, redes de transporte, servicios públicos, espacios naturales o campos de cultivo.

Un aspecto en el que convergen los dos autores citados en este apartado, se refiere a que ambos señalan que la exposición puede variar en tiempo y espacio, por lo cual, esta variable puede disminuir y eliminar el riesgo con el alertamiento anticipado del proceso de peligro.

1.5. Riesgos geológicos

Este apartado contiene la descripción de conceptos básicos para el desarrollo de este trabajo; parte de la conceptualización de los riesgos geológicos, dado que el tema de estudio está enmarcado en ese tipo de riesgos, en lo subsecuente se describen todos los conceptos que permitirán llegar a la evaluación del riesgo sísmico.





De acuerdo con el CENAPRED (2012), son denominados como riesgos geológicos aquellos fenómenos en los que intervienen la dinámica y los materiales del interior de la Tierra o de la superficie de esta; Los procesos naturales considerados como riesgos geológicos son: vulcanismo, sismos o terremotos, tsunamis, movimientos en masa y subsidencias.

Se le conoce como riesgos geológicos a la interacción entre los procesos y materiales litosféricos y los sistemas antrópicos, con elevados costes sociales y económicos (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002).

Las siguientes secciones de esta apartado se enfocarán al conocimiento de los sismos, en función del mecanismo que lo genera, las escalas de medición, así como los métodos para la evaluación de la peligrosidad sísmica.

1.6 Sismo o Terremoto

Según Mena (2002) un sismo o terremoto ocurre cuando el esfuerzo entre dos bloques estructurales de la corteza terrestre alcanza un nivel mayor a la resistencia de la roca, causando que los lados opuestos de la misma fallen de manera repentina o se deslicen de forma violenta pasando de un lado a otro. La resistencia de la falla está relacionada con el tamaño de estos esfuerzos y el coeficiente de fricción del material que la forma, cuando se acumula un esfuerzo lo suficiente grande para sobrepasar la resistencia de la falla, puede ocurrir un terremoto al momento que se libera la energía almacenada en forma de ondas sísmicas las cuales mueven las rocas a su alrededor.

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS, s/f) define al sismo o terremoto como las sacudidas o movimientos bruscos del terreno producidos en la corteza terrestre como consecuencia de la liberación repentina de energía en el interior de la Tierra o a la tectónica de placas.

En la siguiente figura se puede observar el proceso de generación de sismo, nótese que al punto en el cual se genera la liberación de la energía se le llama “foco”, a partir de dicho punto se propagan las ondas sísmicas y el punto en la superficie terrestre más cercano al





foco es conocido como “epicentro”. El rasgo estructural que puede resultar de este proceso es la aparición de una falla

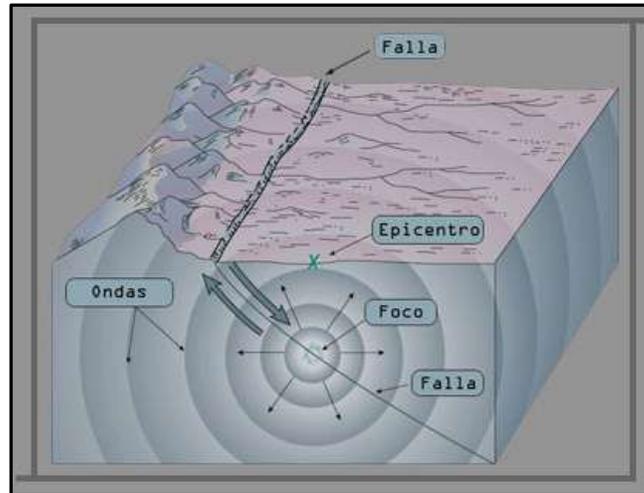


Figura 1.1. Mecanismo de un sismo. Fuente. SMIS, (s/f a).

1.6.1 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas (u ondas elásticas) son la propagación de perturbaciones temporales del campo de esfuerzos que generan pequeños movimientos en un medio. Las ondas sísmicas pueden ser generadas por movimientos telúricos naturales, los más grandes de los cuales pueden causar daños en zonas donde hay asentamientos urbanos (SMIS, s/f b)

Existen dos tipos de ondas sísmicas: ondas de cuerpo y ondas de superficie (Day, 2002).

1.6.1.2 Ondas de Cuerpo

Este tipo de ondas son llamadas ondas de cuerpo ya que pueden pasar a través del interior de la Tierra. Se subdividen en ondas P (primarias) y ondas S (secundarias) (Day, 2002).

Las ondas de cuerpo transmiten los temblores preliminares a un terremoto pero poseen poco poder destructivo (SMIS, s/f b).

Ondas P. Según (Day, 2002) las ondas P también son conocidas como ondas primarias, ondas compresionales u ondas longitudinales. Esta onda sísmica causa una serie de compresiones y dilataciones del material a través del cual viajan. Es la onda más rápida y la





primera en llegar a un sitio. Las ondas P pueden viajar a través de líquidos y sólidos. Debido a que el suelo y las rocas son relativamente resistentes a los efectos de compresión-dilatación, las ondas P tienen el menor impacto en el movimiento del terreno en superficie.

De acuerdo a la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, este tipo de ondas tienen velocidades típicas de 330 m/s en el aire, 1450 m/s en el agua y cerca de 5000 m/s en el granito.

Ondas S. La onda S es también conocida como la onda secundaria, onda de corte u onda transversal. La onda S causa cizallamiento y deformación del material a través del cual viaja. Este tipo de onda solo puede viajar a través de sólidos. De manera general, las ondas S tienen el mayor impacto en el movimiento del terreno en superficie (Day, 2002).

Son llamadas transversales o de corte ya que el suelo es desplazado en forma perpendicular respecto a la dirección de propagación, alternan hacia un lado y hacia el otro (SMIS, s/f b).

1.6.1.3 Ondas de superficie

Este tipo de ondas solo son observadas en la superficie de la Tierra y son el resultado de la interacción de las ondas de cuerpo y de los materiales en la superficie. Se subdividen en ondas *Love* y ondas *Rayleigh* (Day, 2002).

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica menciona que las ondas de superficie son consideradas las ondas más destructivas, ya que debido a su baja frecuencia provocan resonancia en edificios con mayor facilidad.

Ondas Love. Las ondas Love son ondas superficiales que causan cortes transversales en la tierra (SMIS, s/f b). Este tipo de ondas son análogas a las ondas S, en el sentido de que son las ondas de corte transversales que viajan cerca de la superficie de la Tierra (Day, 2002).

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2012 a) define a las ondas *Love*, como ondas superficiales que tienen un movimiento horizontal que es transversal o perpendicular a la dirección a la que la onda está viajando.





Ondas *Rayleigh*. Las ondas *Rayleigh* son ondas que viajan como ondulaciones similares a las que se producen en la superficie del agua (SMIS, s/f b). Estas ondas de superficie son causantes del agitación del suelo mediante un movimiento elíptico, en este tipo no se presentan movimientos perpendiculares ni transversales (USGS, 2012 b). El autor Day (2002) menciona que estas ondas producen tanto el movimiento vertical como horizontal del terreno, así como las ondas que se propagan hacia el exterior.

En la siguiente figura es posible observar el efecto de los diferentes tipo de ondas sísmicas, en primera instancia se puede notar un material que no ha sufrido ninguna modificación; una vez que pasa la onda primaria (P) comienzan a presentarse movimientos de compresión y expansión, al pasar las ondas secundarias (S) se puede observar la amplificación de la longitud de la onda, mientras que las ondas *Love* generar un efecto ondulatorio y las ondas *Rayleigh* producen movimientos perpendiculares al plano por el cual se desplaza la onda sísmica.



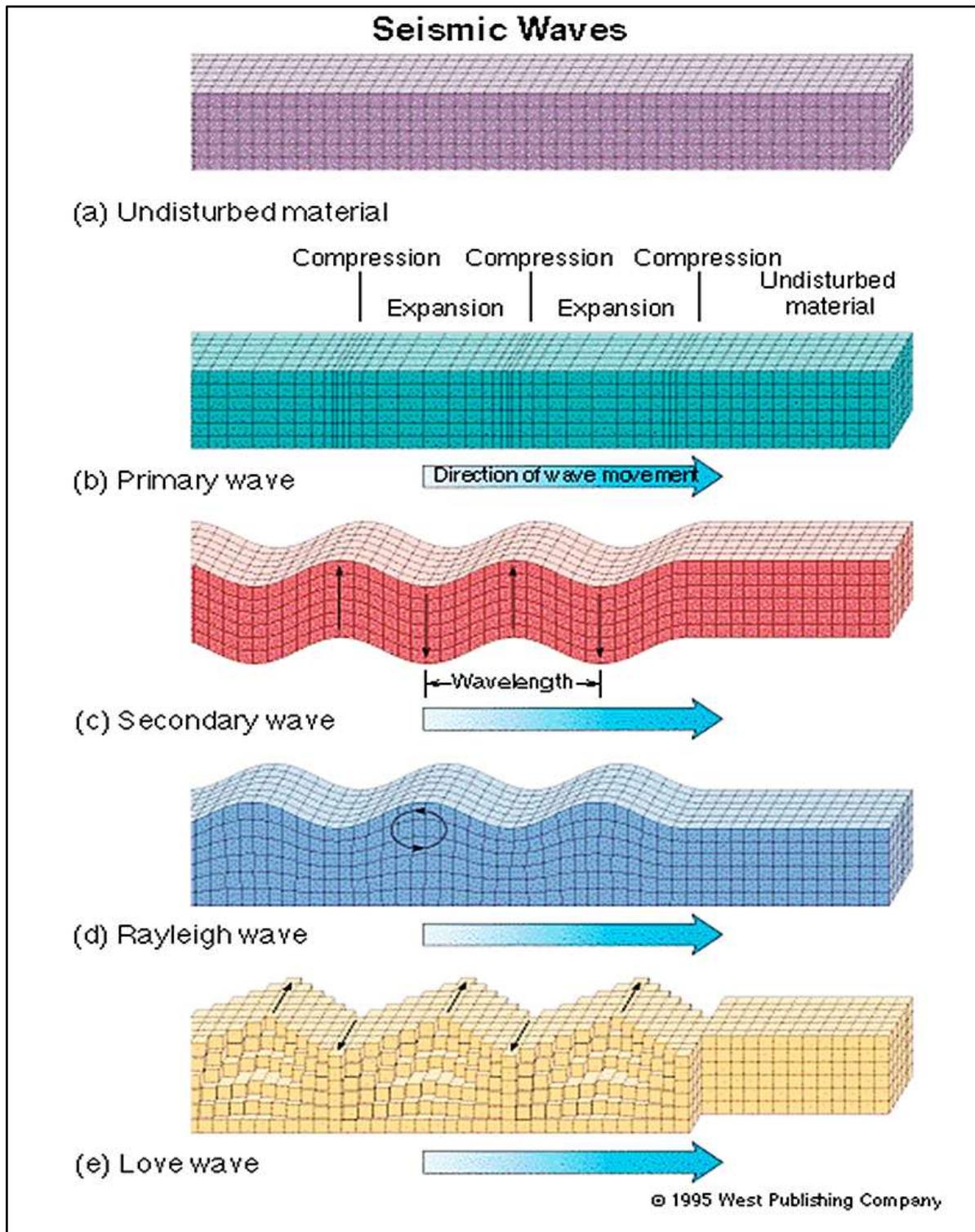


Figura 1.2. Tipos de ondas sísmicas y efectos que producen en los materiales a través de los cuales viajan. Fuente (USGS, 2012 c)





1.6.2 Magnitud de un sismo

En este apartado se presenta la definición de una de las maneras de medir la energía liberada por un sismo, la magnitud, de la cual existen varias escalas, dado que, en ocasiones son distintos los parámetros que se requieren conocer, a continuación se explica cada una de estas escalas y cuáles son las situaciones en las que se utilizan.

La magnitud de un sismo es un parámetro que está relacionado de manera directa con la cantidad de energía liberada en la fuente generadora del sismo. De acuerdo al USGS (2012 d) la magnitud está basada en la medición del máximo movimiento registrado por un sismógrafo.

Es una escala que crece en forma potencial o semilogarítmica, de manera que cada punto de aumento puede significar un aumento de energía diez o más veces mayor. Una magnitud 4 no es el doble de 2, sino que 100 veces mayor (SMIS s/f c).

Debido a razones prácticas, en los últimos años se han desarrollado otras escalas para calcular la magnitud de un sismo, a continuación se presentan estas escalas.

1.6.2.1 Escala de Magnitud Local M_L

La escala de Magnitud Local fue desarrollada en 1935 por el Profesor Charles Richter del *California Institute of Technology* (Instituto de Tecnología de California). Dicha escala fue desarrollada para calcular la magnitud de sismos poco profundos y locales del área del sur de California. Day (2002) menciona que se refiere a esta escala con frecuencia como la escala de *Magnitud Richter*. Sin embargo, como ya se mencionó antes, debido a que esta escala fue desarrollada para medir la magnitud de sismos locales, también es conocida como la Escala de Magnitud Local M_L . Esta escala es la más conocida y usada.

La siguiente tabla muestra las características de esta escala en función de la magnitud, los efectos que provoca y la ocurrencia anual aproximada de sismos.





Magnitud	Efectos del sismo	Ocurrencia cada año (Aproximación)
2.5 o menor	Generalmente no se siente pero es registrado por un sismógrafo.	900,000
2.5 a 5.4	A menudo se siente, pero solo causa daños menores.	30,000
5.5 a 6.0	Ocasiona daños ligeros a edificios y otras estructuras.	500
6.1 a 6.9	Puede causar daños severos en áreas muy pobladas.	100
7.0 a 7.9	Terremoto mayor. Causa graves daños.	20
8.0 o mayor	Gran terremoto. Puede causar destrucción total en comunidades cercanas al epicentro.	Uno cada 5 a 10 años

Tabla 1.2. Escala de Magnitud Local. Fuente: *Michigan Tech. UP Seis* (2007 a).

1.6.2.2 Escala de Magnitud de Ondas Superficiales M_s

De acuerdo a Day (2002) la escala de medición de magnitud de ondas de superficie está basada en la amplitud de las ondas de superficie, teniendo un período de cerca de 20 segundos. Esta escala, con frecuencia es usada para sismos que van de moderados a largos, y los cuales tienen características particulares como la ubicación del foco a poca profundidad. Además de que el sismógrafo que va a registrar el evento debe estar a menos de 1000 kilómetros de distancia del epicentro.

Según Gutenberg (1945) citado por McCalpin (s/f a) la escala de magnitud de ondas superficiales fue desarrollada para solventar el problema de la saturación de registros que se presentan en la escala de Magnitud Richter o M_L por encima de 6.5.

1.6.2.3 Escala de Magnitud Momento M_w

La escala de Magnitud Momento M_w se ha convertido en el método más común utilizado para determinar la magnitud de terremotos largos. Esto se debe a que al final termina por considerar todo el tamaño del terremoto Day (2002).

De acuerdo a McCalpin (s/f a) la magnitud momento muestra de forma más directa la cantidad de energía liberada en la fuente donde se genera el sismo, en lugar de confiar en los efectos que dicha energía produce sobre los sismógrafos que se encuentran a cierta distancia de la fuente.





El USGS (2012 d) menciona que calcular la magnitud momento resulta más complejo en comparación con las otras escalas, ya que está basada en el momento sísmico, el cual es una medida del tamaño de un terremoto basado en la zona de ruptura de una falla, además del promedio del deslizamiento y la fuerza que se requiere para superar la fricción que mantiene juntas a las rocas en las fallas.

1.2.6.4 Intensidad de un sismo

La intensidad de un terremoto es un parámetro que está basado en las observaciones de daños a estructuras y la presencia de efectos secundarios, los cuales son inducidos por los terremotos como deslizamiento de tierras, licuefacción y fallamiento del terreno. Está basada también en el grado en que fue sentido por las personas, lo cual es determinado a través de entrevistas (Day, 2002). La intensidad de un sismo podría ser evaluada de forma fácil en un área urbana donde podría haber un considerable número de pérdidas, sin embargo podría resultar difícil realizar dicha evaluación en áreas rurales.

La escala más común utilizada es la Escala de Intensidad Modificada de Mercalli (MMI, por las siglas en inglés), en la cual los rangos van desde un sismo que no es sentido (I) hasta un sismo que resulta en total destrucción (XII). Day (2002) plantea que en términos generales cuanto mayor sea la magnitud del terremoto y mayor sea el área afectada mayor será la intensidad. Mientras que el Servicio Geológico de Estados Unidos de Norteamérica señala que la intensidad sísmica es un número que describe la severidad de un sismo en términos de los efectos sobre la superficie de la Tierra, los humanos y sus estructuras.

De acuerdo con Mena (2002), la intensidad es la manera de describir los efectos del movimiento del terreno sobre las estructuras construidas por el hombre. Debe ser considerada como una observación subjetiva, ya que no depende de medidas instrumentales. La Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS s/f) sugiere que la intensidad dependerá de factores como la energía del terremoto, la distancia de la falla donde se produjo el terremoto, la forma como las ondas llegan al sitio en que se registran y las características geológicas del sitio donde se registra la intensidad y cómo la población sintió o dejó registros del terremoto.





Intensidad	Efectos
I	Percibido por muy poca gente
II	Sentido sólo por pocas personas en reposo, especialmente en pisos superiores de los edificios. Los objetos colgados con delicadeza pueden oscilar.
III	Se siente bastante en el interior, sobre todo en pisos superiores de los edificios, pero muchas personas no lo reconocen como un terremoto. Los coches parados pueden balancearse ligeramente. La vibración se siente como el paso de un camión.
IV	Durante el día muchas personas lo sienten en el interior; en el exterior pocos. De noche, algunos se despiertan. Platos, ventanas y puertas se agitan; las paredes crujen; la sensación es como un vehículo pesado que golpea el edificio; los coches parados se balancean apreciablemente.
V	Lo siente casi todo el mundo; muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas y cosas por el estilo, se rompen; algunos casos de yeso agrietado; los objetos inestables se vuelcan; a veces se nota la alteración de árboles, postes y otros objetos altos; los relojes de péndulo se pueden parar.
VI	Percibido por todas personas; muchos se asustan y corren al exterior. Algunos muebles pesados se mueven; algunos casos de yeso caído o chimeneas dañadas. El daño es leve.
VII	Todo el mundo corre al exterior. El daño es despreciable en edificios con buen diseño y construcción; de ligero a moderado en estructuras de buena construcción; considerable en estructuras de construcción deficiente o mal diseñadas; algunas chimeneas se rompen. Lo notan las personas que van conduciendo.
VIII	Daño leve en estructuras especialmente diseñadas; considerable en edificios comunes sólidos con derrumbamiento parcial; grave en estructuras de construcción deficiente; paredes de paneles arrancadas de los marcos; caída de chimeneas, mercancías apiladas en fábricas, columnas, monumentos, paredes; muebles pesados volcados; arena y barro expulsado en pequeñas cantidades; cambios en el agua de pozo; dificulta la conducción.
IX	Daño considerable en estructuras especialmente diseñadas, estructuras de armazón bien diseñadas distorsionadas; muy grave en edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios son levantados de los cimientos. El suelo se agrieta de manera evidente. Se rompen las tuberías subterráneas.
X	Algunas estructuras de madera bien construidas se destruyen; la mayor parte de estructuras de mampostería y armazones con cimientos quedan destruidas; el suelo severamente agrietado. Los rieles se doblan. Desprendimientos de tierra considerables en las riberas de los ríos y laderas empinadas. Desplazamiento de arena y lodo. El agua salpica en las orillas.
XI	Pocas estructuras de mampostería, si queda alguna, se mantiene en pie. Los puentes quedan destruidos. Se forman grandes grietas en el suelo. Las tuberías enterradas quedan fuera de servicio. Se producen socavones y desprendimientos de tierra en suelos blandos. Los rieles de tren se doblan.
XII	El daño es total. Se ven ondas en la superficie del suelo. Líneas de visión y nivel distorsionadas. Los objetos son lanzados al aire.

Tabla 1.3. Escala de Intensidad de Mercalli Modificada. Fuente: Keller (2004. p. 38)





1.7 Riesgo sísmico

Al igual que al inicio del presente capítulo se hablo acerca de las variables y componentes del riesgo desde un punto de vista general, en este apartado de abordará la conceptualización de dichos componentes pero referidos de manera específica al riesgo sísmico, el cual es obtenido mediante la evaluación de la peligrosidad sísmica, de la vulnerabilidad estructural, de la vulnerabilidad socioeconómica y de la exposición.

El primer concepto que se presenta está dado por Mena (2002) quien define al riesgo sísmico como las consecuencias sociales y económicas potenciales provocados por un terremoto, como resultado de la falla de estructuras cuya capacidad resistente fue excedida por un terremoto. El mismo autor concluye que el riesgo sísmico depende en una relación directa de la peligrosidad y de la vulnerabilidad, es decir, los elementos de una zona con cierta peligrosidad sísmica pueden verse afectados en menor o mayor medida dependiendo del grado de vulnerabilidad sísmica que tengan, ocasionando un cierto nivel de riesgo sísmico en el lugar.

Para autores como Tenhaus y Campbell (2002), el riesgo sísmico es la posibilidad o probabilidad de experimentar una intensidad en específico de cualquier fenómeno perjudicial en un sitio específico y en un período de interés. Dicho fenómeno es procedente de los efectos asociados a la ocurrencia de un sismo, tales como el temblor de la Tierra, la licuefacción, los deslizamientos de tierras y tsunamis.

Desde un enfoque cuantitativo, se entiende por riesgo sísmico las pérdidas esperadas de todo tipo que ocasionarán los terremotos en un determinado emplazamiento, como consecuencia de la peligrosidad sísmica del lugar y de los elementos vulnerables expuestos al daño (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002).

1.7.1 Peligrosidad sísmica

Para Ayala-Carcedo y Olcina (2002), la peligrosidad sísmica está representada por el proceso que produce los terremotos, el cual consiste en que a partir de la rotura más o





menos extensa de un bloque litosférico se producen una serie de ondas elásticas, éstas son las causantes de forma generalizada de los daños que produce el sismo.

La peligrosidad sísmica es la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un terremoto, provocando efectos adversos a la actividad humana. Estos fenómenos además del movimiento del terreno pueden ser, la falla del terreno, la deformación tectónica, la licuefacción, inundaciones, tsunamis, etc. (Mena, 2002). Éstos últimos, de acuerdo al mismo autor, se deben considerar como efectos colaterales de un terremoto y el tamaño y localización de los mismos dependerá de factores como las características geológicas y geotécnicas del lugar, pero sin duda, también de las características del terremoto, como son el hipocentro, mecanismo, intensidad, magnitud, duración y el contenido frecuencial.

Scawthorn (2002) define a la peligrosidad sísmica como una cuantificación de los diversos efectos en el suelo que puede producir un terremoto, así como también de la probabilidad de que estos efectos sobrepasen ciertos niveles. De una forma más típica, el mismo autor plantea que es una representación que muestra la fuerza con la que la Tierra se sacudirá así como la frecuencia con la cual lo hará. Además también afirma que la peligrosidad sísmica es específica del sitio donde se presenta, dependiendo de la ubicación del sitio así como de las propiedades del suelo bajo el este.

Otros autores como González de Vallejo et al (2004) hablan sobre los análisis de peligrosidad sísmica como estudios que pretenden conocer cuál será el máximo terremoto que afectará a un emplazamiento o región en un período de tiempo determinado. Este mismo autor menciona que existen dos métodos que gozan de aceptación entre la comunidad científica, el primero es el método determinista, el cual se basa en el registro histórico de los terremotos de mayor tamaño; el segundo método es el probabilista, éste se basa en los períodos de recurrencia.

Una vez revisadas algunas definiciones de lo que es la peligrosidad sísmica se procede a la observación de los métodos que sirven para evaluarla. Mismos que en la actualidad están





enfocados al estudio, evaluación y análisis de la respuesta sísmica del terreno o los emplazamientos.

1.8 Respuesta sísmica del terreno

En la actualidad, dada la dificultad de predecir la eventualidad de un sismo, en el campo de la sismología, es de suma importancia medir y analizar cuál es la respuesta que se puede esperar en un emplazamiento determinado al ser sometido a cargas sísmicas, lo cual representa la base de los estudios de riesgo sísmico. El Centro Nacional Para la Prevención de Desastres (CENAPRED, 2012) plantea que el conocimiento de la respuesta sísmica, en específico en terrenos que son “blandos” es de gran importancia, y que es en esos emplazamientos en donde se han desarrollado los principales asentamientos humanos.

Al no poder pronosticar con exactitud el carácter temporal y espacial de la ocurrencia de un sismo, cada vez más son los estudios de riesgo que basan la peligrosidad en la respuesta sísmica del terreno, puesto que esto es un factor que dará pauta para el conocimiento del comportamiento del emplazamiento en cuestión al momento de que sea sometido a cargas sísmicas. Para lograr lo anterior se recurre a la estimación de parámetros geofísicos.

1.8.1 Parámetros geofísicos para estimar la respuesta sísmica del terreno

Es el ámbito de los parámetros geofísicos para estimar la respuesta sísmica del terreno que Huerta *et al* (1998) señalan que las técnicas para estimar las propiedades del suelo están agrupadas en *in-situ*; en este grupo se encuentran los estudios geotécnicos y/o geofísicos, los cuáles son métodos no destructivos; mientras que el segundo grupo está integrado por las técnicas de laboratorio como los métodos de mecánica de suelos y algunos métodos geotécnicos invasivos o destructivos.

Los métodos de estimación de ambos grupos que señala en autor anterior, tienen como objetivo conocer y estudiar lo que en el ámbito de la sismología es conocido como efecto local o efecto de sitio.





1.8.2 Efecto local o de sitio

La modificación de la señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas durante o después de un terremoto, se conoce como efecto local. Esta modificación consiste en la amplificación fuerte de la señal así como una mayor duración de la misma y la modificación de su contenido frecuencial (Rodríguez, 2007).

Huerta *et al* (2003) señala que las condiciones locales del suelo pueden tener efectos significativos sobre los movimientos del terreno creados por la excitación dinámica generada por el terremoto.

De acuerdo a Aki (1988) citado por Acosta (2009) en la Microzonación Sísmica de Tijuana, el llamado efecto de sitio es el resultado de los procesos de depositación, intemperismo, erosión y otros procesos geológicos, los cuales generan fuertes diferencias en las propiedades físicas de las estructuras pequeñas y superficiales. El mismo autor señala que los últimos metros del recorrido de las ondas sísmicas, justo antes de arribar a la superficie terrestre, adquieren gran importancia en la naturaleza del movimiento del terreno; todo ello independiente a los efectos determinados por el tipo de ondas incidentes, por la dirección en que estas llegan a la superficie, así como por la coherencia del campo de ondas incidentes.

Algunas definiciones más actuales como la que propone Fernández (2012) sugieren que los efectos de sitio pueden ser considerados como una función de las propiedades de los suelos y de las características del campo de onda incidente, por tal motivo, tanto el conocimiento de los diferentes mecanismos de transmisión y atenuación de la energía sísmica, como el conocimiento detallado del sitio, en términos de la geometría, topografía, espesor de los sedimentos, velocidad de la propagación de las ondas, módulos elásticos, densidad y amortiguamiento, son esenciales para describir por completo los procesos físicos involucrados en la respuesta sísmica del sitio.

Las condiciones locales del sitio describen los materiales que se encuentran justo debajo de la superficie de la roca basal del sitio. Por lo general se describe en términos de la geología





de superficie o cerca de la superficie, velocidad de ondas de corte y la profundidad de los sedimentos debajo del sitio (Campbell, 2002).

1.8.3 Período dominante del suelo

Uno de los elementos que sirve para conocer el efecto local y por consecuencia la respuesta sísmica del sitio es el período dominante del suelo, el cual, de acuerdo con Acosta (2009), puede ser definido como el período, medido en segundos de la armónica con mayor amplitud del movimiento del suelo. El mismo autor menciona que el valor del período dominante depende características físicas y geométricas de la estratigrafía somera.

De acuerdo a Ayala-Carcedo y Olcina (2002) este parámetro se trata de un movimiento espacial con componentes sobre los tres planos coordenados que, como todo movimiento, puede ser representado por el desplazamiento, la velocidad o la aceleración.

La medición de este parámetro se puede realizar mediante la grabación de “ruido ambiental”, el cual obtiene a través de sensores que captan las frecuencias de las ondas incidentes en el terreno en los tres ejes del plano cartesiano.

1.8.4 Velocidad de ondas de corte

Otro de los elementos empleados para la estimación de la respuesta sísmica está referido a la velocidad de ondas de corte, de la cual Aki (1988) señala que existe una significativa relación entre el efecto de sitio y las condiciones geológicas superficiales, dicha relación puede ser definida a través de la medición de ondas de corte, las cuales, de acuerdo a Acosta (2009), son un elemento básico en los estudios de la amplificación del terreno y de la respuesta de sitio de cuencas sedimentarias; en particular, la velocidad de cortante en los primeros 30 m del subsuelo, es un parámetro útil en las normas actuales de construcción y se le usa en el diseño por sismo. El mismo autor sugiere que esta medición debe ser integrada en los mapas de riesgo, de manera particular en zonas urbanas.

No obstante de que ya se han enunciado los dos anteriores parámetros, existen algunos otros de mayor complejidad pero también mayor eficacia, tal es el caso de la aceleración máxima del terreno (PGA por las siglas en inglés).





1.8.5 Aceleración máxima del terreno (*Peak Ground Acceleration*)

La aceleración es el incremento de la velocidad por unidad de tiempo. Se mide en cm/s^2 . Por ejemplo, una aceleración de 20 cm/s^2 significa que en un segundo la velocidad de una partícula se incrementó 20 cm/s más rápido.

La aceleración máxima del suelo está relacionada con la fuerza de un terremoto en un sitio determinado. Entre mayor es este valor, mayor es el daño probable que puede causar un sismo.

Autores del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (2009), sugieren que la aceleración máxima del terreno tiene relación con la intensidad sísmica, a menudo se piensa que en cuanto más cerca se localice el epicentro de la zona de afectación, mayor será la aceleración, sin embargo, como se ha venido mencionando, las características del subsuelo en términos de topografía, geometría, espesor de sedimentos etc. causa variaciones en la respuesta sísmica, en este caso, en la aceleración máxima que el terreno puede experimentar.

De acuerdo a Brandes (2002), la aceleración máxima del terreno es también una manera común de expresar la atenuación del movimiento del suelo, la cual es una función del tipo y la magnitud del terremoto, la distancia desde la fuente que lo genera y la geología a través de la cual viajan las ondas sísmicas. Las relaciones en torno a la atenuación y la aceleración máxima del terreno son, en palabras del autor, cruciales para determinar la presencia de peligros sísmicos, así como para establecer criterios de diseño sísmico en estructuras de ingeniería.

1.8.6 Mapas predictivos (Mapas de Isosistas)

Según Acosta (2009), los mapas predictivos se pueden elaborar a partir de la elaboración de ecuaciones predictivas basadas en la simulación del rompimiento propuesto para una falla. De acuerdo a este autor, para realizar la selección de la fuente sismogénica capaz de producir terremotos de la manera más probable, se deben considerar los siguientes criterios:





- Fallas que por su cercanía al área de estudio sean capaces de generar movimientos fuertes.
- Fallas que por sus dimensiones y razón de desplazamiento sean capaces de producir terremotos de magnitud mayor a 5.
- Fallas que presenten evidencia de actividad durante el Holoceno.
- Fallas que produzcan el mayor daño en los sitios de mayor interés (concentraciones de población, vías de comunicación, centros industriales y de comercio y estructuras críticas y estratégicas) dentro de la zona de estudio.

Es importante resaltar lo que menciona el autor sobre este tipo de estudios, ya que, los métodos predictivos se basan en el empleo de ecuaciones predictivas, las cuales se originan, en un análisis estadístico de registros de movimiento del suelo en alguna región en particular, y por tanto son válidas para esa región, aunque también suelen ser empleadas en otras regiones con características sismotectónicas similares a las de la región original.

Huerta (2012) sugiere que, para realizar mapas predictivos basados en la hipótesis del rompimiento de una falla y la magnitud con la cual ésta lo haría, el modelo a realizar debe poner especial consideración en las condiciones locales o el efecto de sitio que se genera de acuerdo a la zona de estudio, tomando en cuenta tanto la geología superficial, así como algunas características del subsuelo, lo anterior con el afán de no darle un valor determinante a las intensidades sísmicas tomando como base la sola relación de que conforme se alejan de la fuente éstas irán disminuyendo.

Hasta aquí se han visto las posibilidades para evaluar el primer componente del riesgo sísmico, en lo sucesivo se hablará sobre el otro componente del riesgo, mismo que será utilizado en este trabajo y está referido a la vulnerabilidad sísmica o estructural.

1.9 Vulnerabilidad sísmica/estructural

Mena (2002) define la vulnerabilidad sísmica como un valor único que permite clasificar a las estructuras de acuerdo a la calidad estructural intrínseca de las mismas. Dentro de un rango de nada vulnerable a muy vulnerable ante la acción de un terremoto.





Autores como Flores *et. al* (2006) se refieren a la vulnerabilidad en el ámbito de las estructuras como la susceptibilidad que tiene una construcción a presentar algún tipo de daño, provocado por la acción de algún fenómeno natural o antropogénico.

Definiciones más simples como la que plantea Porter (2002) se refieren a la vulnerabilidad sísmica como una función de pérdidas que a su vez es función de una excitación tal como la intensidad de un movimiento.

Algunas definiciones cortas sugieren que la vulnerabilidad estructural es la posibilidad que al menos ocurra algún tipo de falla en una estructura dada una intensidad sísmica (R. Clarke, 2011).

Para obtener el grado de vulnerabilidad sísmica de una estructura de una manera sencilla pero básica es necesario recurrir a algunos fundamentos de ingeniería sísmica, los cuales se presentan en el siguiente apartado.

1.9.1 Dinámica de los sistemas elásticos

De acuerdo a Beles *et al* (1975) cualquier sistema elástico puede oscilar con cierto grado de libertad a consecuencia de un impulso inicial, o debido a la acción de fuerzas perturbadoras periódicas o no periódicas. Según los mismos autores, para caracterizar a un sistema oscilatorio se deben considerar los siguientes elementos fundamentales:

- La frecuencia (períodos) de oscilación, este elemento presenta el número de oscilaciones del sistema en una unidad de tiempo.
- Amplitud, la cual es la distancia máxima que alcanzan los puntos del sistema, es medida a partir de la posición estática de equilibrio.

En otras palabras, se puede definir a un sistema elástico como aquel que es capaz de recuperar su forma original luego de haber sido sometido a fuerzas o desplazamientos impuestos (Maureira, s/f).

En el caso de los estudios de riesgo sísmico, el suelo por sí mismo puede representar un sistema elástico, pero en el caso de la vulnerabilidad estructural o sísmica, los sistemas





elásticos están representados por las estructuras creadas por el hombre, tales edificaciones sencillas como viviendas típicas hasta edificios de múltiples niveles y grandes alturas.

1.9.2 Resonancia de una estructura

La resonancia es definida como una condición en la cual el período de vibración del movimiento del suelo inducido por el terremoto, es igual al período natural de vibración de la construcción (Day, 2002). Según el mismo autor, cuando la resonancia ocurre, la respuesta de movimiento de la estructura es mayor, por lo cual la amplitud de la vibración de la estructura aumenta rápidamente. En general, los edificios altos, puentes y otras estructuras de gran tamaño, responden más a los movimientos del suelo con períodos altos de vibración, mientras que estructuras pequeñas responden más a períodos cortos de vibración.

Espinoza y Huerta (2012) plantean que para calcular el período natural de vibración de un edificio de manera sencilla, con el afán de saber si es posible que entre en resonancia, previo conocimiento del período del suelo sobre el cual se sitúa, basta con dividir el número de niveles del edificio entre diez. De acuerdo a Day (2002), se puede aplicar una regla general que dice que el período de vibración es igual a 0.1 veces el número de niveles de un edificio de manera aproximada, es así que de manera general, un edificio de 10 niveles debería tener un período natural de vibración de alrededor de un segundo.





1.10 Sistema de Información Geográfica

Existen diversas definiciones referentes a los sistemas de información geográfica, mismas que han variado a través del tiempo, no obstante, la mayoría de ellas conservan la esencia de que dichos sistemas están conformados de una serie de elementos interrelacionados.

Es un sistema computarizado que provee cuatro conjuntos de capacidades para operar sobre datos georreferenciados: entrada, almacenamiento y recuperación, manejo y análisis y salida (Aronoff, 1993, en Iturbe *et al* 2009).

Debe ser entendido como la integración de elementos tales como datos geográficos, procedimientos, personal y un sistema informático conformado por *software* y *hardware* que permitan el manejo, análisis y modelación de procesos territoriales para la resolución de problemas con una connotación espacial (Iturbe *et al* 2009).

Un Sistema de Información Geográfica integra *hardware*, *software*, además de que permite la captura, manejo, análisis y despliegue de todas las formas de información con referencia espacial. El SIG, permite observar, entender, cuestionar, interpretar y visualizar datos de muchas formas, que revelan interrelaciones, patrones y tendencias en forma de mapas, gráficos y reportes (ESRI, 2011)

1.10.1 Componentes del SIG

Un Sistema de Información Geográfica consta de cinco componentes (Figura 1.3), de los cuales, cada uno cumple una función en específico, lo que permite que haya una interacción y el funcionamiento del sistema.



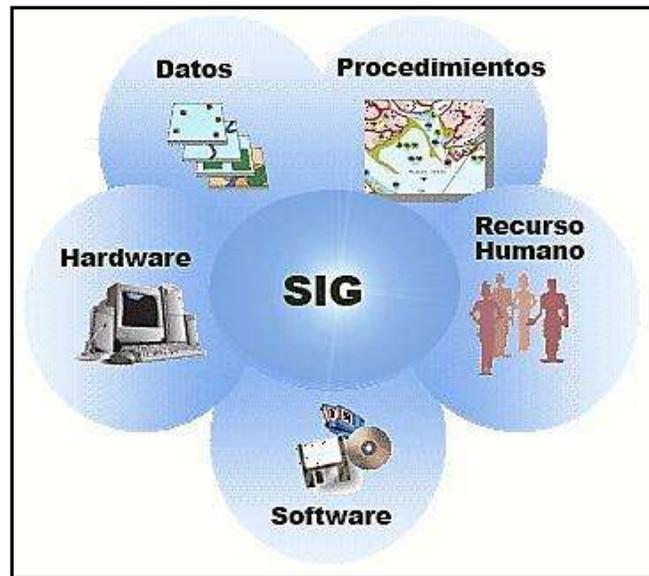


Figura 1.3 Componentes de un Sistema de Información Geográfica. Fuente: Gacano's Blog

A continuación se describen cada uno de los componentes del SIG de acuerdo a la Organización de Las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2006):

Hardware

El *hardware* es el computador donde opera el SIG. Hoy por hoy, los SIG se pueden ejecutar en una gran variedad de plataformas, que pueden variar desde servidores (computador central) a computadores *desktop* (escritorio) o Laptop (portátil) que se utilizan en las configuraciones de red o desconectado.

Software

Los programas de SIG proveen las funciones y las herramientas que se requieren para almacenar, analizar y desplegar información geográfica. Los componentes más importantes son: Un Sistema de Administración de Base de Datos (DBMS), herramientas que permitan búsquedas geográficas, análisis y visualización e Interfaz gráfica de fácil acceso para el usuario.





Datos

El componente más importante de un SIG son los datos; se requiere de buenos datos de base, lograr esto con frecuencia absorberá el 60-80% del presupuesto de implementación de un SIG. El sistema integra los datos espaciales con otros recursos de datos y puede incluso utilizar los administradores de base de datos (DBMS) más comunes para organizar, mantener y manejar los datos espaciales y toda la información geográfica.

Recurso humano

La tecnología SIG está limitada si no se cuenta con el personal adecuado que opere, desarrolle y administre el sistema, y llevar a cabo los planes de desarrollo para aplicarlos a los problemas del mundo real. Entre los usuarios de SIG se encuentran los especialistas técnicos, que diseñan y mantienen el sistema para aquellos que los utilizan diariamente en su trabajo.

Procedimientos

Para que un SIG tenga éxito, este debe operar de acuerdo a un plan bien diseñado y estructurado y acorde con las reglas de la empresa o institución, que son los modelos y prácticas operativas características de cada organización.

1.10.2 Modelos de datos en los SIG's

Existen dos modelos de datos con los cuales se puede trabajar en un SIG, se explican a continuación.

Vector

Está conformado mediante puntos, líneas y polígonos; cada característica de un punto se representa como un par de coordenadas único, mientras que las características de línea y de polígono se representan como listas ordenadas de vértices. Los atributos se asocian con cada tipo de figura vectorial (ESRI, 2011).





Raster

Un modelo de datos espacial que define el espacio como un conjunto de celdas de igual tamaño dispuestas en filas y columnas, y compuesto por bandas individuales o múltiples. Cada celda contiene un valor de atributo y coordenadas de ubicación.

1.10.3 Sistemas de Información Geográfica y Evaluación del Riesgo Sísmico

Existen diversos trabajos de investigación sobre la temática del riesgo sísmico en los que se tiene como herramienta principal un sistema de información geográfica. Autores como Mena (2002) señalan que, el sistema de información geográfica creado para la evaluación del riesgo sísmico en la Ciudad de Barcelona demuestra ser una excelente herramienta para la generación, gestión, representación y análisis de escenarios de daño bajo diferentes hipótesis, menciona además que los resultados son de aplicación inmediata a la gestión de protección civil en materia de una emergencia sísmica. Iglesias *et, al.* (2006) plantea en su trabajo de evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas que, mediante las herramientas de los sistemas de información geográfica es posible estimar, con carácter preliminar y de forma rápida y sencilla la vulnerabilidad de las edificaciones en materia de riesgo sísmico.

Moreno y Aguilar (2003) definen la relevancia de utilizar un sistema de información geográfica como la capacidad de éste en la superposición de capas tanto de peligro como de vulnerabilidad y además resaltan la capacidad de un sistema de este tipo para asignar atributos a las capas de información, sin duda útiles en la estimación del riesgo, en comparación de otros sistemas de cartografía automatizada.





CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO





2.1 Introducción

En el presente capítulo se aborda lo referente a la metodología propuesta y desarrollada para el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de este trabajo; dicha metodología se desarrolla en cuatro etapas principales, en cada una de ellas se analizarán variables específicas para alcanzar los objetivos particulares. Así mismo, se mencionan las fuentes de donde es obtenida la información y la utilidad que tiene cada una de las variables en el proceso principal de evaluación del riesgo. Así mismo, se presentan los insumos y materiales que se fueron requeridos.

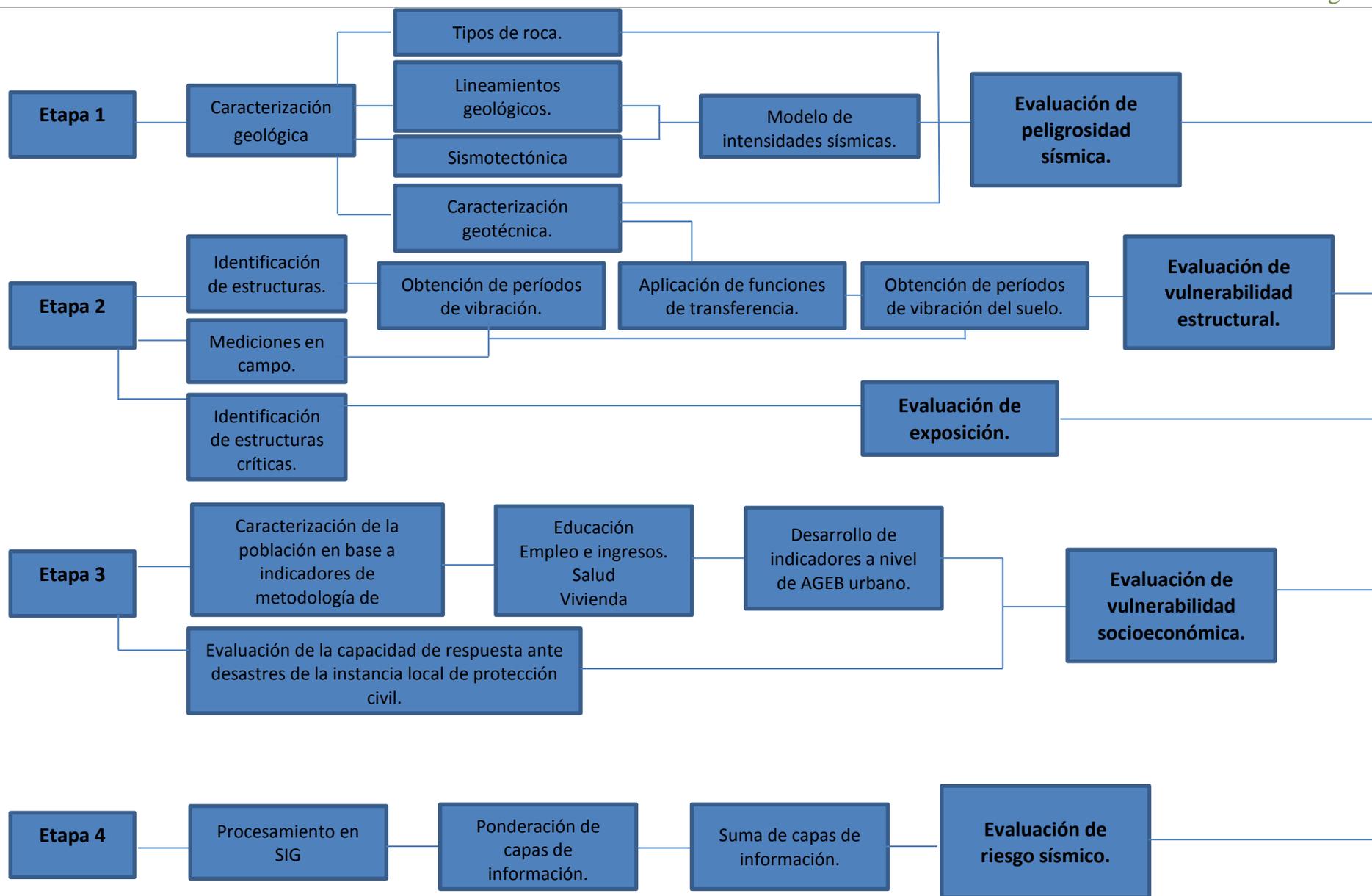
2.2 De los métodos para evaluar el riesgo sísmico

Para evaluar el riesgo sísmico existen dos métodos que gozan de aceptación entre los científicos afines a esta temática; el primero y más utilizado es el método probabilista, el cual se desarrolla mediante técnicas estadísticas que tienen como objetivo conocer cuál es la probabilidad de ocurra un terremoto de cierta magnitud en determinado lugar.

El segundo método es el determinista, en este se supone que la sismicidad futura será igual a la pasada, siendo el máximo terremoto ocurrido el máximo previsible (González de Vallejo, 2002). Es decir, se plantea la ocurrencia de un sismo hipotético a partir de una fuente generadora, la cual puede ser una falla geológica, y previo conocimiento del comportamiento de dicha fuente se calcula cuál sería la magnitud del sismo, en un siguiente paso, el cálculo de la magnitud es transformado a una escala de intensidad, con la cual es posible hacer una primera zonificación de peligrosidad sísmica, la cual es complementada con la evaluación de la respuesta sísmica del terreno.

En esta investigación se utilizará el método determinista, el cual es adoptado porque implica el análisis de distintas variables, las cuales pueden ser abordadas desde un enfoque geográfico, además de que no requiere del análisis estadístico de datos que a este nivel no es posible procesar los cuales serían requeridos si se optara por aplicar el método probabilista. El siguiente diagrama (Figura 2.1) muestra la estructura general del marco metodológico.





“Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Urbana de Tijuana, Baja California mediante el uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica”

Figura 2.1 Estructura general del marco metodológico.





En primera instancia se puede plantear que, para llegar a la evaluación de riesgo sísmico, se parte de la evaluación de la peligrosidad sísmica (Etapa 1), esta será representada en un producto cartográfico; el siguiente paso está representado por la evaluación de vulnerabilidad estructural (Etapa 2), cabe mencionar que es en esta misma etapa en la cual es posible evaluar otro de los componentes del riesgo, la exposición. Como resultado del desarrollo de la siguiente etapa, se realiza la evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica (Etapa 3). Por último, la evaluación/obtención del riesgo sísmico es resultado de la unión y correlación de las anteriores etapas (Etapa 4).

Etapa 1. Evaluación de la peligrosidad sísmica

Desde un enfoque sistémico, se consideró válido realizar el planteamiento de que la caracterización geológica es el elemento primordial sobre el que se basan la mayoría de los resultados de esta investigación, ya que, en gran medida es la base geológica en sus diferentes enfoques, la variable que controla el comportamiento de variables consecuentes.

En primera instancia, con la finalidad de tener un contexto de los tipos de roca o bien geología superficial de la zona de estudio, se realizó un proceso de vectorización de cartas geológicas escala 1:50,000 de INEGI, dicho proceso permitió obtener un producto cartográfico específico de la zona de estudio; además de lo anterior, se recurrió a estudios previos de la descripción estratigráfica de Tijuana y sus principales formaciones geológicas, con lo cual fue posible ampliar el panorama en esta temática al tiempo de corroborar en la información oficial retomada en primera instancia, encontrando congruencia y factibilidad de uso para etapas posteriores.

Al igual que los tipos de roca, los lineamientos geológicos, fueron identificados de manera inicial con la información de primera mano. Esta información permitió enmarcar a la zona de estudio en el contexto de la presencia de fracturas y fallas geológicas a una escala general pero útil. Sin embargo, ya que la zona de estudio se ubica en la región sísmica más activa del país, existe diversidad de estudios específicos entorno a la sismotectónica regional, con lo cual, después de realizar una selección de las fallas activas, documentadas y con presencia dentro de la zona de estudio así como su área de influencia en el contexto





regional, fue posible la caracterización de éstas en función de sus parámetros de movimiento y aspectos sismotectónicos. Con la anterior el pasó a seguir fue la selección del o los lineamientos considerados como fuentes de peligro sísmico. Cabe mencionar que dos en específico han sido estudiados en varias investigaciones por investigadores locales y de la región y han sido planteados como fuentes potenciales de peligro por excelencia; puesto que son fuentes cercana al área de estudio, además de que el máximo sismo que pueden generar ($M=6.5$) se considera que podría causar serias afectaciones a la ciudad; considerando que el objetivo de esta investigación no es abundar en el aspecto geológico-estructural, lo anterior fue considerado determinante para la realización del modelo de intensidades sísmicas.

Fue en esta temprana fase de la investigación en la que se llegó a un punto crucial de decisión, ya que, por una parte, el modelo de intensidades sísmicas resultante del análisis de las variables descritas con anterioridad, es por sí mismo ya una evaluación de la peligrosidad sísmica, sin embargo, al observar la estructura general de la metodología, se puede notar que en esta etapa aparece la variable de caracterización geotécnica, la cual es de importancia en los estudios de riesgo sísmico y en este caso en particular marca la pauta para lograr la obtención de resultados referentes a la respuesta sísmica del terreno; dado lo anterior se procedió a retomar estudios geotécnicos realizados en la zona de estudio, primero en un contexto de las condiciones geotécnicas generales de la ciudad y después en la descripción particular de cada uno de ellos. Lo anterior permitió, por una parte, concluir lo planteado en el la primera etapa de esta investigación y en segundo lugar dar pasó al desarrollo de la siguiente etapa, considerando a esta variable como fundamental e indispensable para la obtención del siguiente componente del riesgo.

Etapa 2. Evaluación de la vulnerabilidad estructural

Es importante mencionar que, en el ámbito del riesgo sísmico, la evaluación de la vulnerabilidad estructural, es objeto de investigaciones específicas, ya que dada su complejidad en otros niveles y la diversidad de enfoques desde los cuales puede ser abordada, dominada por el enfoque ingenieril, en esta investigación se buscó y analizó la manera en la cual pudiera ser evaluada, considerando que existía cierta disponibilidad de





recursos tanto en información como académicos, además de tener en cuenta que es una variable inherente al riesgo sísmico.

Dado lo anterior, se procedió en primer lugar, a la identificación de estructuras (edificaciones de más de tres niveles), a partir del uso de la plataforma *Google Earth* en conjunto con sus aplicaciones *Street View* y *3D View* de edificios, mismos que fueron procesados para su posterior uso en la plataforma Arc Map de Arc GIS 9.3 en formato *shapefile*; una vez obtenida esta información se calculó la frecuencia o período natural de vibración de cada una de las estructuras identificadas.

Después, con ayuda de algunas mediciones realizadas en campo, pero con el peso específico de los resultados obtenidos de la caracterización geotécnica desarrollada en la etapa inicial, se aplicó el uso de funciones de transferencia usadas en el ámbito de la geofísica con la finalidad de obtener la frecuencia o período natural de vibración del suelo. Cabe mencionar que la caracterización geotécnica se realizó de manera general, como ya se mencionó en párrafos anteriores, en las tres principales zonas de la ciudad.

Una vez obtenidas las dos variables ya mencionadas, se procedió a la identificación de las zonas con mayor grado de vulnerabilidad estructural, dicho esto como la búsqueda de las zonas cuyo resultado de la correlación de las dos variables se encuentra en determinado valor ya establecido como el de mayor peligro; la manera de identificar dicha situación es obteniendo el cociente del período de la estructura sobre el período del suelo, con la finalidad de encontrar resultados que pertenezcan al rango que muestra la siguiente expresión, tomada de Bazán y Meli (2002):

$$0.7 \leq T_E/T_S \leq 1.2$$

Dónde:

T_E = Período de vibración de la estructura

T_S = Período de vibración del suelo.





Lo anterior se conoce como región de respuesta máxima, es decir aquellos valores de vibración que se encuentre entre 0.7 y 1.2 segundos, lo cual, en palabras de Basan y Meli (2002), es el intervalo de períodos desaconsejables para el modo fundamental de vibración de un edificio, por lo cual es recomendable que, cuando se planea y diseña una edificación, ésta se ubique fuera de esa región.

Es aquí donde se considera pertinente acotar que, se habla de peligro en esta etapa, no en el mismo sentido del peligro utilizado en la etapa 1, más bien es importante entender que, para determinar el grado de vulnerabilidad estructural fue necesario identificar aquellas estructuras que por sus condiciones mismas de creación en conjunto con las condiciones locales del suelo sobre el que se sitúan, están en determinado peligro de sufrir daños, dejando claro que no tiene que existir una fuente generadora de peligro sísmico con una magnitud o intensidad determinadas y específicas, es entonces un proceso aleatorio que supone que una variable puede activar o no a la otra en caso de darse la dinámica adecuada.

Etapa 2.1 Evaluación y análisis de exposición

Otro de los componentes del riesgo está referido a la exposición; se identificaron lo que se denomina estructuras críticas; en este caso se retomaron trabajos de georreferenciación de escuelas, mismas que van desde aquellas que son del nivel básico hasta nivel superior, tanto del sector público como privado. Dichas escuelas fueron cruzadas con la división de la ciudad a nivel de AGEB urbano, el cual fue clasificado en rangos de acuerdo a la concentración de población en cada uno de ellos. Con lo anterior se obtuvieron los niveles de exposición relacionando dos variables, es decir, unidades espaciales con determinada concentración de población, ya sea alta o baja y con determinada concentración o presencia de centros educativos de igual manera alta o baja, teniendo así unidades espaciales con diversos grados de exposición. Aunado a lo anterior se realizó también ubicación y suma de la capa de hospitales, lo cual es un aspecto que, desde el punto de vista de la exposición puede variar mucho más en la escala tiempo-espacio en comparación con las escuelas.





Etapa 3. Evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica

Esta etapa de la investigación está basada de manera principal en la metodología propuesta por el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED) para la evaluación de la vulnerabilidad física y social; dicha metodología plantea una serie de indicadores de con determinada ponderación para cada uno de ellos, la mayoría de estos indicadores son posibles de obtener utilizando información de los censos de población y vivienda, además de que está planteada para desarrollarse es una escala espacial a nivel de localidad. Dado lo anterior, surgió la necesidad de modificar y adaptar el desarrollo de esta metodología en función de dos factores principales:

El primer factor radica en la temporalidad de la información, es decir, los indicadores de la metodología fueron planteados en función de las características y variables de los censos de población y vivienda vigentes en el año de la publicación (2006). En consecuencia, dado que el último censo (2010) sufrió modificaciones en su estructura y variables no fue posible obtener todos los indicadores, por lo que se procedió a realizar una selección de variables vigentes útiles para el desarrollo de la mayoría de los indicadores. Cabe mencionar que, dicha selección no discrimina en su totalidad ninguno de los rubros planteados en la metodología.

El segundo factor de modificación apareció cuando surge la idea de trabajar a una escala espacial de mayor detalle. La metodología podía llegar a un nivel máximo de detalle de localidad, tanto urbana como rural; en el caso de esta investigación se dispuso que el valor máximo de detalle fuera el Área Geoestadística Básica urbana (AGEB), con el cual se consideró posible tener resultados más certeros entorno a la vulnerabilidad socioeconómica. Es así que este factor tuvo influencia en la selección de indicadores ya mencionada en el párrafo anterior. Otra modificación está el relacionado a las características de la vivienda que, si bien son un indicador o elemento útil para la evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica, para la temática de este trabajo son más útiles y coadyuvan en la evaluación de la vulnerabilidad estructural, misma que se aborda en la segunda parte de este capítulo.





Se realizó una caracterización de la población en función de los rubros de los indicadores; se tomaron en cuenta aspectos relacionados a Educación, Empleo e Ingresos, Salud y Vivienda. Con dicha caracterización se desarrollaron los indicadores para cada uno de las AGEBs que conforman el área de estudio y se obtuvo un producto cartográfico. En las siguientes tablas se muestran los indicadores, así como su fórmula de obtención y su descripción.

Rubro: Salud		
Indicador	Fórmula	Descripción
Médicos por cada 1,000 habitantes.	$PM = \text{NoM} / \text{PT} \times 1000$ Donde: PM = Proporción de médicos. NoM = Número de médicos en el municipio. PT = Población total.	La Secretaría de Salud indica que es aceptable que exista un médico por cada 1,000 habitantes. La baja proporción de médicos se reflejará en las condiciones de salud de la población, lo que agudiza las condiciones de vulnerabilidad, situación que se podría acentuar en caso de emergencia o desastre.
Porcentaje de la población no derechohabiente	$\%PND = \text{PND} / \text{PT} \times 100$ Donde: %PND = Porcentaje de Población No Derechohabiente. PND = Población No Derechohabiente. PT = Población total.	Este indicador muestra el porcentaje de la población no derechohabiente, la cual es la que menos acceso tiene a servicios de salud y en consecuencia es la que en menor medida acude a las instituciones de salud, esta situación incide directamente en la vulnerabilidad de la población.

Tabla 2.1 Indicadores considerados para el rubro salud

Rubro: Educación		
Indicador	Fórmula	Descripción
Porcentaje de analfabetismo	$\%A = \text{P15aA} / \text{PT15a} \times 100$ Donde: %A = Porcentaje de analfabetismo. P15aA = Población de 15 años y más analfabeta. PT15a = Población total de 15 años y más.	Es un indicador que muestra el retraso en el desarrollo educativo de la población, que refleja la desigualdad en el sistema educativo. La falta de educación es considerada como uno de los factores claves con respecto a la vulnerabilidad social.
Demanda de Educación Básica	$\text{DEB} = \text{PT6_14aAE} / \text{PT6_14a} \times 100$ Donde: DEB= Demanda de Educación Básica. PT6_14aAE = Población de 6 a 14 años que asiste a la escuela PT6_14a = Población total de 6 a 14 años.	El indicador muestra a la población que se encuentra en edad de demandar los servicios de educación básica, la cual es fundamental para continuar con capacitación posterior que proporcione las herramientas para acceder al mercado laboral.





Grado promedio de escolaridad	<p style="text-align: center;">GPE = SAAP15a/PT15a</p> <p>Donde: GPE = Grado Promedio de Escolaridad. SAAP15a = Suma de Años Aprobados de Primero de Primaria hasta el último año alcanzado de la población de 15 años y más. PT15a = Población Total de 15 años y más.</p>	Refleja a la población que cuenta con menos de nueve años de educación formal, la educación secundaria es obligatoria para la conclusión del nivel básico de educación. Se considerará a la población mayor de 15 años que no ha completado la educación secundaria como población con rezago educativo.
-------------------------------	---	--

Tabla 2.2 Indicadores considerados para el rubro de educación

Rubro: Vivienda		
Indicador	Fórmula	Descripción
Porcentaje de viviendas sin agua entubada.	<p style="text-align: center;">%VNDAE = TVNDAE/TVPH x 100</p> <p>Donde: %VNDAE = Porcentaje de Viviendas que No Disponen de Agua Entubada. TVNDAE = Total de Viviendas que No Disponen de Agua Entubada. TVPH = Total de Viviendas Particulares Habitadas.</p>	La falta de agua entubada en caso de desastre puede llegar a retrasar algunas labores de atención, ya que el llevar al lugar agua que cumpla con las mínimas medidas de salubridad toma tiempo y regularmente la obtención y el almacenamiento de agua en viviendas que no cuentan con agua entubada se llevan a cabo de manera insalubre.
Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje.	<p style="text-align: center;">%VND = TVND/TVPH x 100</p> <p>Donde: %VND = Porcentaje de Viviendas que No disponen de Drenaje. TVND = Total de Viviendas que No Disponen de Drenaje. TVPH = Total de Viviendas Particulares Habitadas.</p>	La carencia de drenaje en una vivienda puede llegar a aumentar su vulnerabilidad frente a enfermedades gastrointestinales, las cuales en situaciones de desastre aumentan considerablemente.
Porcentaje de viviendas con piso de tierra.	<p style="text-align: center;">%VPT = TVPT/TVPH x 100</p> <p>Donde: %VPT = Porcentaje de Viviendas con Piso de Tierra. TVPT = Total de Viviendas con Piso de Tierra. TVPH = Total de Viviendas Particulares Habitadas.</p>	Las viviendas de piso de tierra aumentan la vulnerabilidad de sus habitantes frente a desastres naturales, ya que el riesgo de contraer enfermedades es mayor y su resistencia frente a ciertos fenómenos es menor que otro tipo de construcciones.

Tabla 2.3 Indicadores considerados para el rubro de vivienda





Rubro: Empleo e Ingresos		
Indicador	Fórmula	Descripción
Razón de dependencia.	$RD = \frac{P0_14a + P65a/P15_64a}{100}$ Donde: RD = Razón de Dependencia P0_14a = Población de 0 a 14 años. P15_64a = Población de 15 a 64 años.	Mientras mayor sea la razón de dependencia, más personas se verán en desventaja frente a un desastre de origen natural ya que su capacidad de respuesta y prevención prácticamente va a ser nula.
Tasa de Desempleo Abierto	$TDA = \frac{NoPD}{PEA} \times 100$ Donde: TDA = Tasa de Desempleo Abierto. NoPD = Número de Personas Desocupadas. PEA = Población Económicamente Activa.	Este indicador se refiere directamente a la situación de desempleo que influye sobre la capacidad de consumo de la población así como en la capacidad de generar los recursos que posibiliten la adquisición de bienes satisfactorios.

Tabla 2.4 Indicadores considerados para el rubro de empleo e ingresos

Rubro: Población		
Indicador	Fórmula	Descripción
Porcentaje de la Población de Habla Indígena.	$\%PI = \frac{P5HLI}{P5} \times 100$ Donde: %PI = Porcentaje de Población Indígena. P5HLI = Población de 5 años y más que Habla una Lengua Indígena. P5 = Población de 5 años y más.	La mayoría de los municipios donde se asienta la población indígena, presenta una estructura de oportunidades muy precaria, lo cual se refleja en condiciones de vulnerabilidad de esta población.

Tabla 2.5 Indicadores considerados para el rubro de población

Otro aspecto un tanto independiente a la variable obtenida anteriormente, pero, que se consideró pertinente incluir en esta etapa de la investigación ya que, puede o no acentuar el proceso vulnerabilidad en términos generales, está referida a la evaluación de la capacidad de respuesta de la ciudad ante un proceso de desastre. Mediante una entrevista personal realizada al responsable de protección civil de la ciudad, se obtuvo información referente a este tema, indagando sobre la posesión de la dependencia de equipo especializado y herramientas útiles en la evaluación, prevención y monitoreo de procesos generadores de peligro. Lo anterior aunado a la capacidad intelectual y profesional de la persona encargada de tomar las decisiones ante situaciones de emergencia de esa índole.





Cabe mencionar que la anterior variable surgió también de la metodología ya mencionada, se plantea además una ponderación para cada una de las respuestas, sin embargo, esto no puede ser representado de manera cartográfica, por lo que se consideró enviar el resultado a un anexo, el cual puede ser complementario en el análisis de los niveles de riesgo sísmico.

Etapa 4. Procesamiento en Sistema de Información Geográfica

A través del desarrollo de las distintas variables en cada una de las etapas del marco metodológico, se requiere del uso de una plataforma de sistema de información geográfica, ya sea para la simple obtención de productos cartográficos, o para el análisis y estudio de resultados. No obstante, esta etapa de la metodología lleva el peso específico del uso de este tipo de sistemas y a su vez su uso se vuelve indispensable para lograr el objetivo general planteado en un inicio.

Se debe recordar que en cada una de las etapas anteriores se evaluó cada uno de los componentes del riesgo; si bien en ese momento de la investigación cada uno de estos componentes se analizó e interpretó por separado, es en esta etapa en la cual se ven correlacionados todos, al ser procesados cada uno como capas de información que en conjunto dieron como resultado los distintos niveles de riesgo sísmico.

De manera particular, cada una de estas capas de información se obtuvieron en un inicio en formato vectorial, una vez determinada la ponderación de sus valores propios resultado de su desarrollo y análisis, mediante un proceso de rasterización automatizado fueron convertidos a un formato (*raster*) que permitió la unión o sobreposición de capas, como se le conoce en el ámbito de los SIGs, que dio como resultado un producto cartográfico denominado mapa de riesgo sísmico.

La aplicación de la plataforma de Sistema de Información Geográfica se explica de manera más amplia, a partir de la descripción del diagrama de flujo o modelo lógico del proceso de obtención de productos cartográficos o capas de información, en el siguiente apartado.



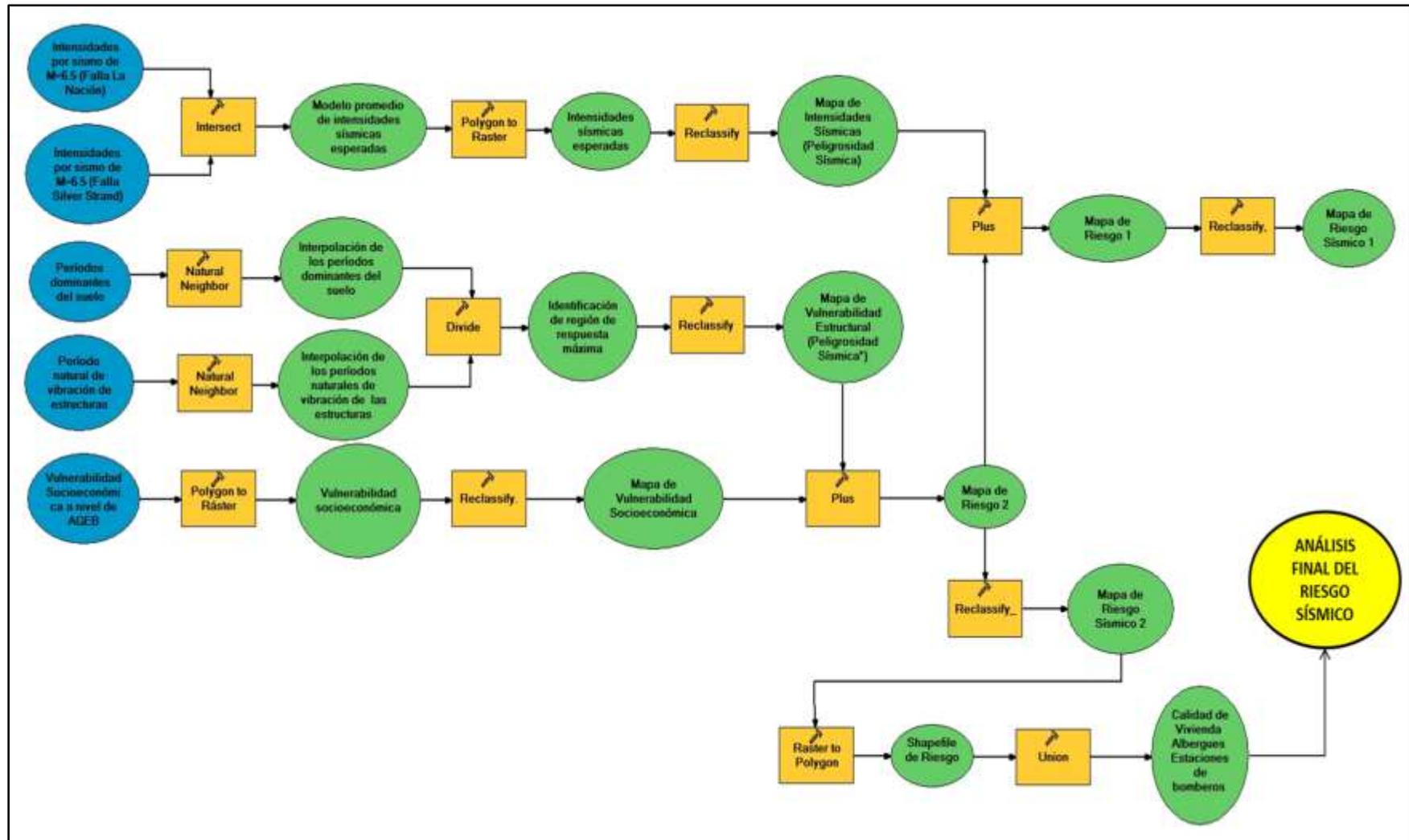


Figura 2.2 Diagrama de flujo que representa el proceso de la aplicación de la plataforma de Sistema de Información Geográfica.





Etapa 4.1 Aplicación de la plataforma de Sistema de Información Geográfica

Como se puede observar en el diagrama de flujo o modelo lógico (figura 6), existe una constante en todo el proceso, tanto en el uso del tipo de información, como en los procesos de la plataforma del Sistema de Información Geográfica, dicha constante está representada en primer lugar, por el uso inicial de capas de información en formato vectorial, mismas que fueron ponderadas y convertidas a formato *raster*, el cual permitió la realización de la sobreposición de capas de información, obteniendo así mapas finales referentes a los niveles de riesgo sísmico a los que está sometida la zona de estudio.

El inicio del diagrama muestra que, a partir de dos modelos de intensidades sísmicas esperadas o mapas de isosistas ya existentes, el primero de ellos generado a partir del planteamiento del rompimiento de la Falla La Nación y el segundo de la Falla *Silver Strand*, ambos con un sismo hipotético de magnitud $M=6.5$; con dichos modelos y con el apoyo de la aplicación *Intersect* de Arc Map, fue posible obtener un modelo promedio de intensidades sísmicas esperadas, el cual fue convertido a formato *raster* mediante la aplicación *Polygon to raster* del mismo software tomando como referencia el campo de la base de datos que posee el valor ponderado para cada una de las intensidades posibles. Una vez realizado lo anterior, el producto resultante fue reclasificado con el uso del módulo *Reclassify*, con lo cual fue posible obtener un primer modelo de peligrosidad sísmica dividido en tres rangos, alto, medio y bajo.

En el siguiente subproceso, el diagrama muestra que, se parte de dos capas de información base, ambas en formato vectorial; la primera de éstas se refiere a la localización puntual de sitios de cálculo del período dominante del suelo, la segunda representa la localización de estructuras en la zona de estudio, cada de una de estas capas de puntos, por separado, fueron interpolados mediante el uso de la aplicación *Natural Neighbor*, con lo cual se obtuvieron dos nuevas capas de información ya en formato *raster*; una vez realizado lo anterior, mediante la aplicación *Raster Calculator* del módulo *Spatial Analysis* de Arc Map, se realizó una operación de división, es decir, se obtuvo el cociente resultante de dividir el período de vibración de las estructuras sobre el período de vibración del suelo, cumpliendo de esta forma la fórmula $0.7 \leq TE/TS \leq 1.2$ propuesta por Bazán y Meli (2002), misma que





se explica en la página el apartado de vulnerabilidad estructural. Con lo anterior, fue posible obtener una capa de información que mostrara de manera espacial lo que se conoce como región de máxima respuesta, es decir, aquellos valores de vibración que se encuentran entre 0.7 y 1.2 segundos. Después, esta capa fue reclasificada a modo de obtener el mapa de vulnerabilidad estructural, teniendo a la región de máxima respuesta con el grado más alto de vulnerabilidad estructural. Es importante mencionar que, tal como se explica en otros capítulos, el producto resultante de la evaluación de vulnerabilidad estructural, en determinado momento puede fungir como elemento de peligrosidad, por tal razón se denota de esa manera en el diagrama de flujo.

El siguiente subproceso del modelo lógico tuvo como objetivo la obtención del mapa de vulnerabilidad socioeconómica; la elaboración de este producto cartográfico tuvo su máximo desarrollo en la generación de la base de datos, en la cual, a partir de la información del Censo de Población y Vivienda 2010 de INEGI, le fueron aplicados los indicadores de la metodología propuesta por CENAPRED para evaluar vulnerabilidad social, mismos que se detallan en el capítulo IV. Una vez desarrollados dichos indicadores, se procedió a la unión de la base de datos de vulnerabilidad con el archivo *shapefile* de AGEBS de la zona del estudio mediante el uso de un *join* en Arc Map. Lo anterior permitió tener una nueva capa de información con valores ponderados para la variable en cuestión, por lo que el siguiente paso fue convertir la capa de información vectorial a formato *raster* mediante la aplicación que se indica en el diagrama; una vez reclasificado el producto resultante se obtuvo el Mapa de Vulnerabilidad Socioeconómica a nivel de AGEBS.

Una vez realizados los tres subprocesos anteriores se llegó a la consecución de tres productos cartográficos o su vez capas de información principal, en primer lugar, el Mapa de Peligrosidad Sísmica (Intensidades Sísmicas), en segundo lugar el Mapa de Vulnerabilidad Estructural y por último el Mapa de Vulnerabilidad Socioeconómica. De lo anterior sobreviene un segundo proceso relevante el cual se explica a continuación.

Mediante el uso de la aplicación *Raster Calculator* del módulo *Spatial Analysis* de Arc Map, como se puede observar en el diagrama con la operación *plus* se superpusieron y sumaron las tres principales capas de información, con lo cual, una vez realizado el debido





procedimiento de reclasificación se obtuvo un primer mapa de riesgo sísmico, nombrado en el diagrama como “Mapa de Riesgo Sísmico”

Es pertinente hacer notar que, en el anterior proceso en que se obtiene el mapa de Riesgo Sísmico 1, el flujo del diagrama se ve suspendido a partir de la consecución de dicho producto cartográfico y se marca a éste como punto final del proceso, lo anterior se debe a que, tal como se explica de manera detallada en el Capítulo V, el modelo de riesgo sísmico con el factor de peligrosidad basado en los modelos de intensidades sísmicas, no fue considerado como factible en esta investigación para realizar los análisis posteriores de riesgo. Dada la anterior circunstancia se derivó el siguiente proceso que a continuación se explica.

Como ya se ha explicado en párrafos anteriores, el modelo de vulnerabilidad estructural, en determinado momento de la evaluación del riesgo puede fungir también como factor de peligrosidad, por lo cual, esta variable, con ayuda de la aplicación *Raster Calculator* y la operación *plus*, tal como se muestra en el diagrama, fue sobrepuesta y sumada a la capa de información que representa a la vulnerabilidad socioeconómica, el resultado de esto fue reclasificado en tres rangos, obteniendo así el “Mapa de Riesgo Sísmico 2”, que muestra niveles altos, medios y bajos.

Se decidió que el segundo mapa de riesgo sísmico sería el de mayor factibilidad para la investigación y por lo tanto, sobre este mapa se realizaron los análisis subsecuentes. Dado lo anterior, en un proceso inverso a los que se habían presentado a través del desarrollo de este diagrama o modelo lógico, el mapa elegido y obtenido en formato *raster* fue convertido a formato vectorial, mediante el uso de la aplicación *Raster to polygon* de Arc Map, obteniendo así una capa de información sobre la cual se pudieron verter otros elementos de análisis en el mismo formato; dicho procedimiento fue posible mediante la unión de capas de información por separado, de elementos como la distribución de la calidad de vivienda, la ubicación de albergues, estaciones de bomberos, gasolineras y hospitales, con lo cual se obtuvieron diversos productos cartográficos de análisis del riesgo, mismos que son posibles de observar en apartados posteriores de esta investigación.





Cabe mencionar que los resultados de la aplicación de la plataforma de Sistema de Información Geográfica, están abiertos a la introducción de nuevas variables, tanto en las variables de entrada como en las últimas de análisis; así como también se puede permitir el uso y aplicación de otros métodos de análisis espacial.





CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA, GEOTÉCNICA Y EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA





3.1 Introducción

En el presente capítulo se aborda lo referente a los aspectos geológicos y estructurales, mismos que en conjunto con otros elementos forman parte de la base de esta investigación. Es así que en primera estancia se presenta una caracterización de la geología superficial, reforzada a su vez por aspectos relacionados con la estratigrafía de algunas formaciones existentes en el área de estudio. A partir de la caracterización de los lineamientos geológicos que conforman el área de estudio, así como también aquellos del contexto regional es posible observar la descripción de aquellos que se pueden considerar como una fuente de peligro potencial; con lo anterior se presenta un modelo de intensidades sísmicas esperadas a causa del rompimiento de dos fallas en específico. Por último, en este capítulo se presenta la caracterización geotécnica de la ciudad, con la cual se sientan las bases para alcanzar el cumplimiento de objetivos en etapas posteriores de la investigación.

3.2 Geología y sismotectónica del norte de Baja California

De acuerdo con Gastil *et al* (1975), el norte de Baja California está formado por dos subregiones que desde el punto de vista geológico son diferentes; la subregión ubicada al oeste está conformada por las sierras peninsulares, las cuales están constituidas por rocas graníticas, volcánicas y metamórficas, en dicha subregión se localizan elevaciones de hasta 3500 msnm, como el llamado “Picacho del Diablo” en la Sierra de San Pedro Mártir. La subregión ubicada al este se caracteriza por la presencia de valles (cuencas) de la Laguna Salada, San Felipe y el Valle de Mexicali-Imperial, dentro de este último se localiza el Volcán Cerro Prieto. Respecto a la edades de las rocas, van desde el período paleozoico hasta el cuaternario.

Según el mismo autor, la actividad sismotectónica del norte de Baja California, tiene relación con tres grupos de fallas activas. El primero de estos está formado por las fallas Imperial, Cerro Prieto Cucapá y Laguna Salada, localizadas en el Valle de Mexicali-Imperial. El segundo grupo está relacionado con el escarpe principal del Golfo de California y lo conforman la Falla de San Pedro Mártir, el lineamiento San Felipe y las fallas asociadas con el escarpe de Sierra de Juárez. El tercer grupo lo integran las fallas que





atraviesan las sierras peninsulares, como Agua Blanca y San Miguel-Vallecitos (Figura 3.1). Aunado a las anteriores estructuras, existen varias fallas de índole submarinas en la periferia de la parte terrestre, las cuales en conjunto, forman un modelo neotectónico el cual define la existencia de dos provincias estructurales principales, la península norte-centro a lo largo del Escarpe Principal del Golfo y la Depresión del Golfo de California.

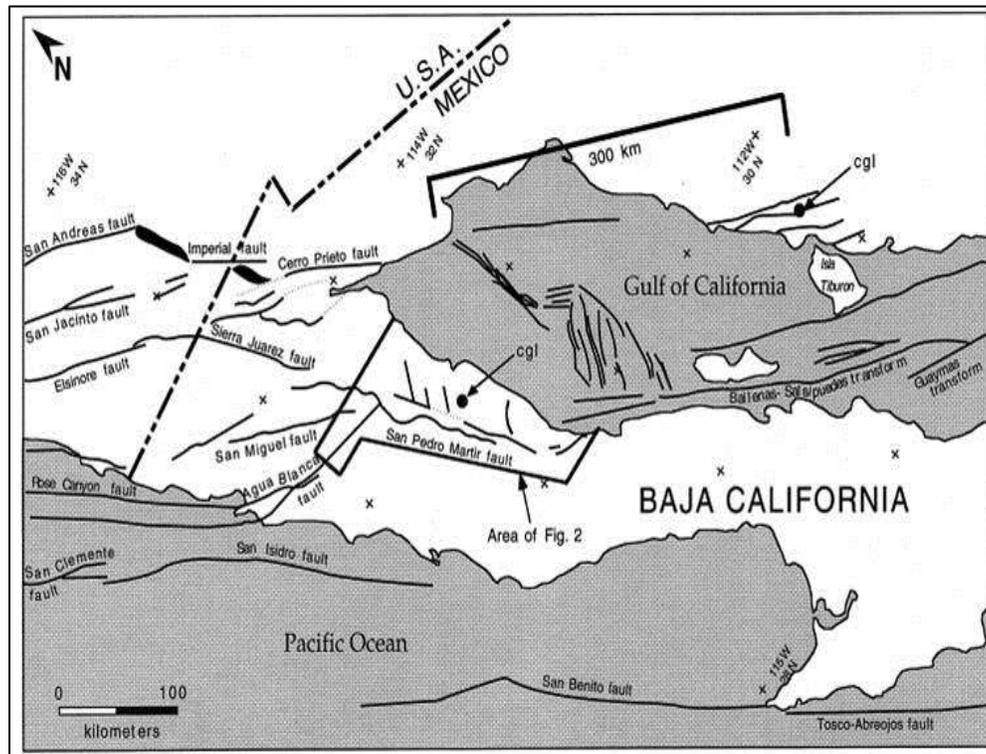


Figura 3.1 Estructuras geológicas del norte de Baja California. Fuente: Lewis y Stock (1998).

3.3 Geología superficial del área de estudio

A partir de la línea de costa en la parte noroeste del Área Urbana de Tijuana, de acuerdo con el mapa (Figura 3.2) elaborado en base a las cartas geológicas escala 1:50 000 de INEGI, es posible observar en primera instancia, un afloramiento de limolitas y areniscas que se concentran en la parte de la llanura costera; a medida que el cambio de relieve provoca un ascenso altitudinal, se puede observar una asociación de areniscas y conglomerados, que en la parte norte solo son interrumpidos por la formación de valles fluviales que contienen materiales de origen aluvial. Algo similar se presenta en la parte suroeste, donde se observa la misma asociación de areniscas y conglomerados, la cual se ve





interrumpida por el corte realizado por fallas y fracturas que dan lugar al afloramiento de conglomerados en las partes más altas. Al respecto, Minch (1967) menciona que el área conformada a partir de la línea de costa desde Tijuana hasta Playas de Rosarito, es dominada por la formación *Rosarito Beach*, la cual data del Mioceno y es una sucesión de flujos basálticos, rocas piroclásticas y rocas sedimentarias clásticas; esta a su vez está sustentada por areniscas del Eoceno las cuales están recubiertas por areniscas y conglomerados del Plioceno pertenecientes a la Formación San Diego; éstas últimas son los afloramientos que se pueden observar en el mapa geológico.



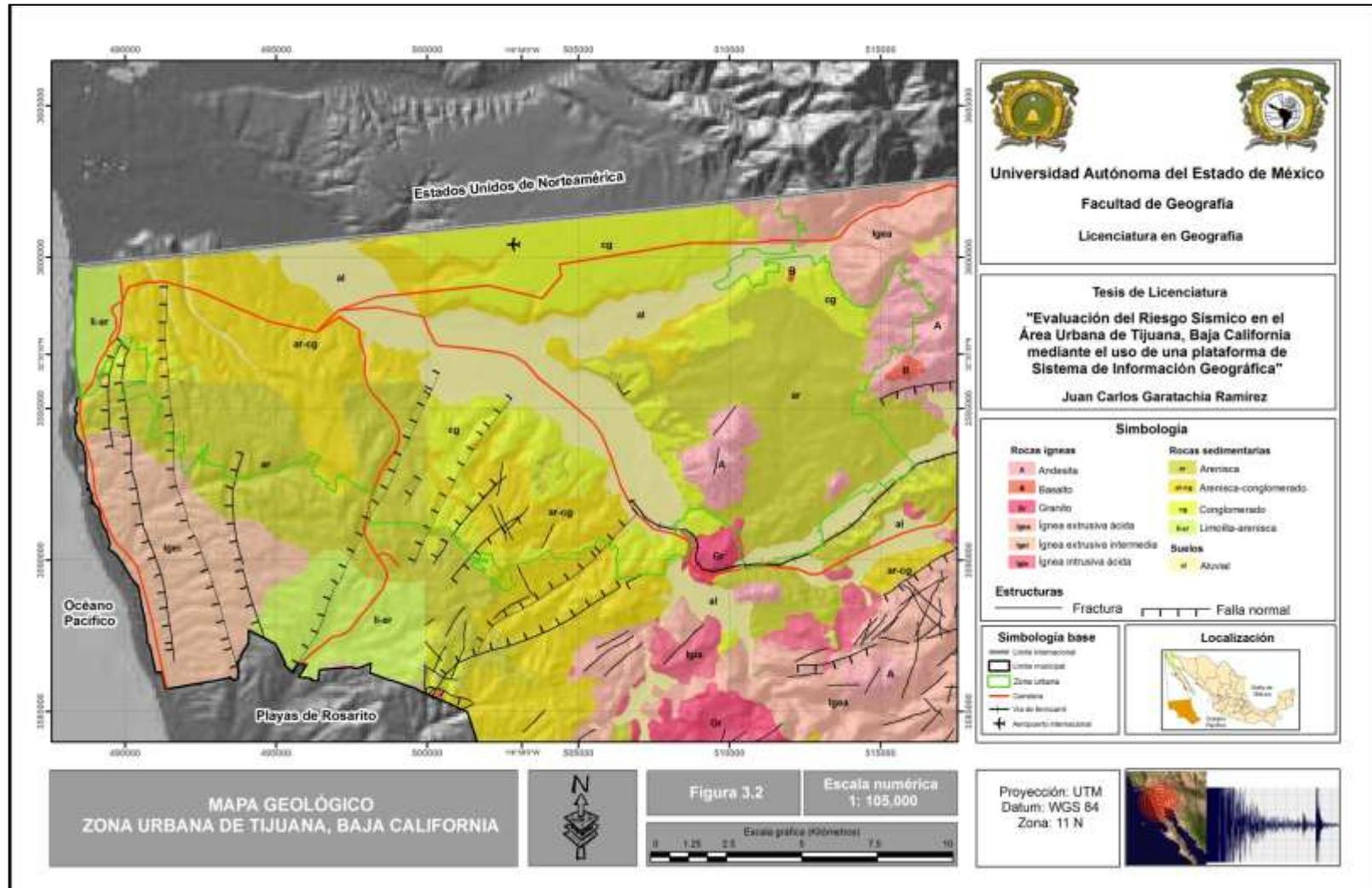


Figura 3.2 Mapa geológico de la zona urbana de Tijuana.





Según Flynn (1970), la configuración geológica de la parte central y este del Área Urbana de Tijuana, que denomina como el área de “La Gloria-Presa Rodríguez” en su estudio, incluye rocas volcánicas, piroclásticas y derivados epiclásticos que datan del Jurásico Superior y/o del Cretácico Inferior; rocas batolíticas, gabro, granodiorita, cuarzo y monzonita; conglomerados de la Formación Redonda que datan del Cretácico Superior; lutitas y areniscas de la Formación Rosario del Cretácico Superior; una secuencia de lutitas, areniscas y basaltos referidas a la Formación Delicias y Buenos Aires que datan del Eoceno y la Formación *Rosarito Beach* del Mioceno.

Como se puede observar en el mapa geológico, la configuración está dada por la presencia de areniscas, que predominan en el extremo sureste, conglomerados en la parte norte en el límite con los Estados Unidos de Norteamérica, antecedidos por asociaciones de areniscas y conglomerados en las zonas de frontera con la extensa planicie aluvial que forma el Río Tijuana y que atraviesa en sentido noroeste-sureste con una extensión hacia la parte noreste, la cual está compuesta por sedimentos recientes, que en conjunto con las otras rocas que ya se han mencionado, según Flynn, datan del Plioceno y Pleistoceno. Además es posible observar al sureste una estructura de origen volcánico constituida por roca de tipo andesítica que sobresale en dos puntos, el segundo con menor extensión, al igual que una estructura de basalto que se observa casi en el extremo noreste.

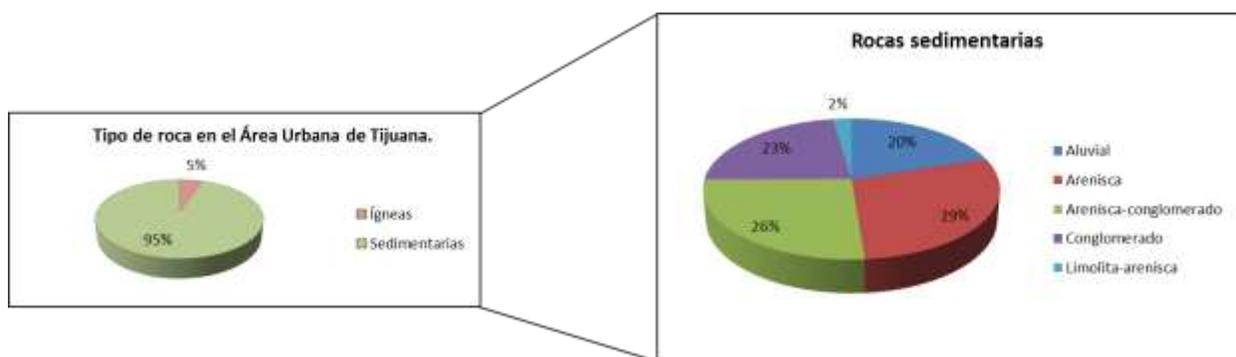


Figura 3.3 Distribución porcentual por tipo de roca en el área urbana de Tijuana. Fuente: Elaboración propia con base en mapa temático.





La gráfica anterior muestra que de acuerdo al cálculo de superficies de cada uno de los diferentes tipos de roca, existe una marcada predominancia de rocas de tipo sedimentario, en especial aquellas que son areniscas, asociaciones de areniscas y conglomerados, así como una importante presencia de conglomerados y sedimentos de tipo aluvial.

3.4 Lineamientos geológicos

En el contexto regional, la Península de Baja California se localiza en el límite entre la Placa del Pacífico y la Placa Norteamericana. El resultado del deslizamiento de estas dos placas, según Legg *et al.* (1991) citados por Cruz (2002), se manifiesta en el norte del estado con una zona de cizalla conocida como la Zona de Cizalla del Sur de California (*Southern California Shear Zone*). Esta zona da lugar a la formación de una microplaca que rota en sentido opuesto a las manecillas del reloj.

Respecto al contexto subregional, de acuerdo con lo que menciona Minch (1967), en lo que él denomina como área *Tijuana-Rosarito Beach* y que corresponde a la parte noroeste y suroeste de lo que en la actualidad es la zona urbana de Tijuana, la estructura se caracteriza por varias fallas normales que cortan los estratos, lo cual genera diversos bloques de fallas, dichos lineamientos conforman el sistema principal de fallas que tienen una tendencia norte-sur y que, por lo regular son paralelas a la actual línea de costa y en algunos puntos coinciden con ésta. Lo anterior se puede observar en el mapa de lineamientos geológicos regionales (Figura 3.4).

El mismo autor señala que, el sistema norte-sur de fallas normales son de alto ángulo, con caídas de 50° a 70° en la mayoría de los lugares y los cortes producidos por éstas dan lugar a numeroso bloques de fallas que generan un estructura de *graben-horst* con una tendencia general hacia la costa. En lo que respecta a la edad de los lineamientos, la mayoría de la fallas cortan rocas que datan del Plioceno.



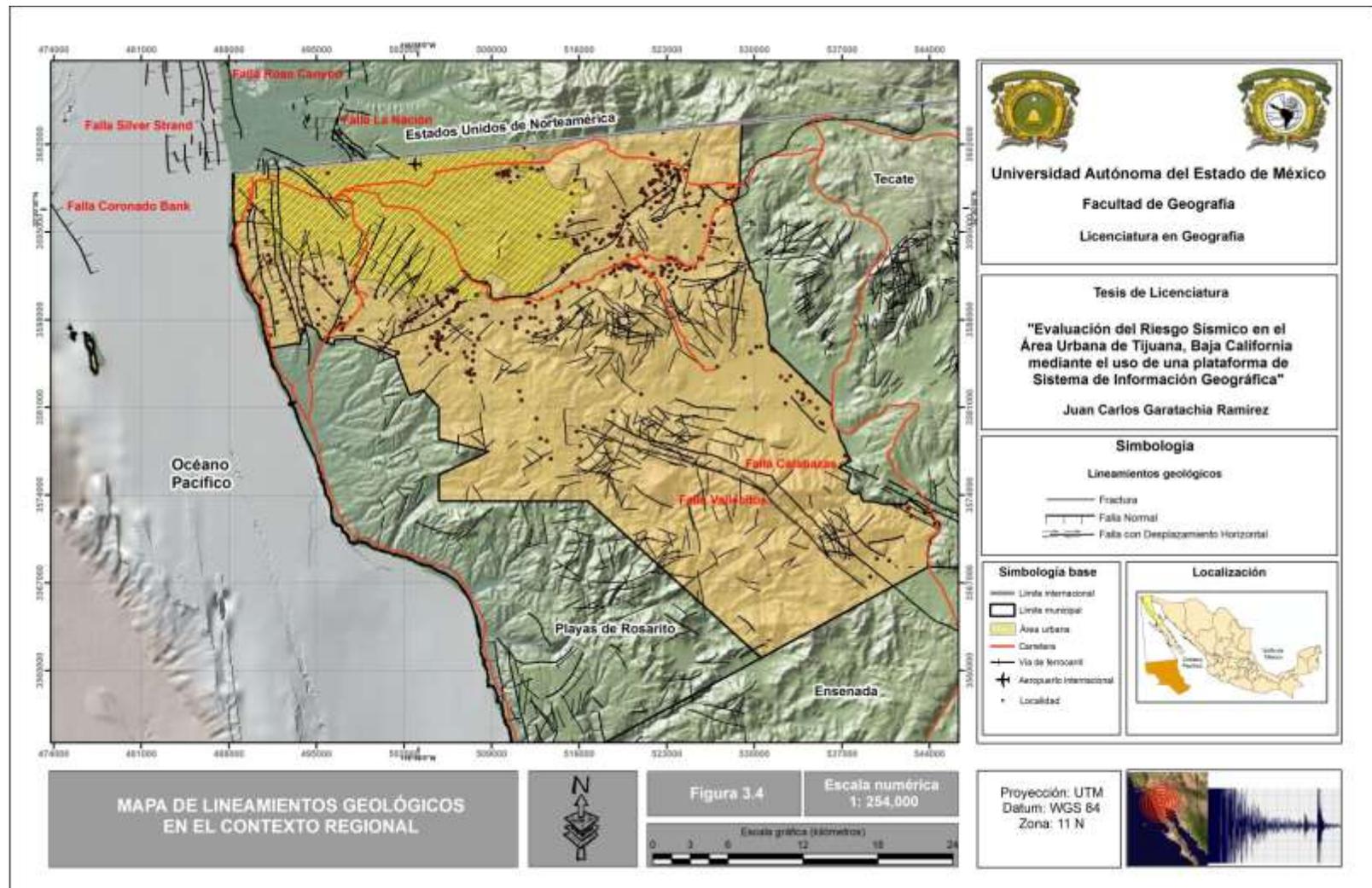


Figura 3.4 Mapa de lineamientos geológicos regionales.

"Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Urbana de Tijuana, Baja California mediante el uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica"





La parte oriental del territorio de Tijuana, partiendo de norte a sur, está dominada por la presencia de fracturas que cortan en su mayoría a las rocas de origen ígneo; de acuerdo a las cartas geológicas de INEGI y como se puede observar en el mapa, solo se han podido identificar algunas fallas de tipo normal y de menor longitud si se comparan con las de lado oeste; las de menor longitud, de manera general tienen una orientación este o este, mientras que las de tamaño medio, por así decirlo, continúan con una predominancia en la orientación norte-sur, tal como ocurre en el sistema de fallas del noroeste en la frontera con los Estados Unidos de Norteamérica.

En la parte sur, también se observa la presencia de numerosas fracturas, mismas que no siguen un patrón de orientación ni de alineación unas con otras. El único factor en el que coinciden es que la mayoría se localiza cortando rocas de origen ígneo.

Resalta la presencia de dos fallas de gran longitud, las cuales han sido asociadas a un sistema de fallas y son conocidas con el nombre de Falla Calabazas y Falla Vallecitos, esta última con movimiento horizontal. Este sistema de fallas, conformado también por la Falla San Miguel, que no es posible observar en el mapa, será retomado más adelante.

3.5 Fallas activas que pueden afectar a la Ciudad de Tijuana

El contexto regional sobre el que se sitúa la Ciudad de Tijuana, según Cruz (2002) se remonta al Plioceno, ya que desde ese tiempo la Región del Norte de Baja California ha sido afectado por fallas laterales, de las cuales su movimiento general está gobernado por el sistema San Andrés-Golfo de California, donde se han identificado fallas que pueden generar sismos hasta de magnitud $M=7$.

A continuación se presenta una descripción de las fallas que pueden representar una fuente de peligro potencial para la ciudad de Tijuana.

Falla *Coronado Bank*

Esta falla se localiza alrededor de 20 km al oeste de la Ciudad de Tijuana. Autores como Cruz (2002) han asociado a esta falla a un sistema que conforma en conjunto con la Falla





Agua Blanca, misma con la que según el autor, se une en la bahía de la Ciudad de Ensenada, ciudad que se ubica a 100 km al sur de Tijuana.

La Falla *Coronado Bank* fue asociada por Artim *et al* (1989) a una concentración de epicentros fuera de costa al sur y al oeste de San Diego California en el período comprendido entre enero de 1932 y 1983, esta concentración indica un lineamiento que se extiende casi en 100 km. El mismo autor plantea que la zona es sísmicamente activa con numerosos eventos con magnitud mayor a $M=4$ y varios con magnitud mayor a $M=6$. Parte de este lineamiento ha sido asignado con el nombre de Falla Coronado Bank.

Algunas características de la Falla *Coronado Bank* son propuestas por el *Southern California Earthquake Data Center* (SCEDC, 2011), quienes plantean que la longitud de la falla es de al menos 90 km, pero puede llegar a 180 km si se le considera el alineamiento que tiene con la Falla Palos Verdes al norte de California, proponen una velocidad desplazamiento de 2 mm por año; mientras que esta instancia californiana no propone un sismo con determinada magnitud para esta falla Artim *et al* (1989) plantearon que el máximo terremoto creíble para esta falla podría ser de $M=7.5$ con un máximo terremoto probable de al menos $M=6.7$.

Falla *Rose Canyon*

El sistema *Rose Canyon* ha sido estudiado por los científicos estadounidenses y en especial por los del Estado de California con especial énfasis por el peligro sísmico que representa en la Región de San Diego y por consecuencia en la Zona Urbana de Tijuana, Baja California.

El SCEDC (2011), se refiere a este lineamiento como la Zona de Falla *Rose Canyon* (*Rose Canyon Fault Zone*). Este mismo centro de investigación del sur de California plantea que, entre las características de este lineamiento se ha registrado que es de tipo lateral derecho (Hart, *et al*, 1989), con una velocidad de deslizamiento de 1 mm por año (Petersen y Wesnousky, 1994), además de que se propone que esta velocidad podría ser mayor en caso de que algunos segmentos paralelos que no han sido medidos presenten también una cantidad significativa de deslizamiento. Lo anterior se ve reforzado por la idea de Rockwell





et al (1989) quienes estimaron que la velocidad de desplazamiento de este sistema es menor a 5 cm pero mayor que 5 mm. Respecto a la longitud aproximada de la zona de falla se plantea que es de 30 km, en la cual Jennings (1994) identificó la superficie de ruptura más reciente perteneciente al Holoceno en una parte y el resto al Cuaternario tardío. Autores como Raines *et al* (1991) estiman que la longitud de esta zona de falla podría llegar hasta los 80 km.

En lo referente a los sismos que se podrían generar como consecuencia de la ruptura de algún segmento de esta falla, existe concordancia entre los autores que se han consultado, ya que Anderson *et al* (1989), Rockwell *et al* (1989), Lindvall y Rockwell (1989, 1990), Power et al (1986) citados por Berger y Schug (1991) y Raines *et al* (1991) coinciden en que podría ocurrir un sismo con magnitud de al menos $M=6.5$ hasta $M=7.25$, considerando una ruptura de al menos 30 km.

Algunos estudios en los que se ha estudiado al Sistema *Rose Canyon* han sido extendidos a la parte de Tijuana, ya que se ha considerado que en conjunto con San Diego California Conforman una zona metropolitana.

Falla *Silver Strand*

Esta falla es considerada como una de las fuentes potenciales de peligro para la Ciudad de Tijuana, ya que se localiza a alrededor de 3 km al oeste de la zona en el Océano Pacífico. Entre otras, ha sido tomada como referencia para modelar escenarios de desastre por parte del Ayuntamiento de Tijuana.

El USGS (2012, e) propone para esta falla una velocidad de desplazamiento de 1.5 mm por año. Así como la probabilidad de generar un sismo con una magnitud de hasta $M=6.9$. Por su parte Rosquillas *et al* (s/f) proponen una magnitud máxima de $M=6.5$.

Autores como Reichle (1991) y en general en la bibliografía consultada se encuentra a la Falla *Silver Strand* como una extensión hacia el sur de la zona de falla *Rose Canyon*, por lo que comparten algunas características. Sin embargo, a pesar de que la falla *Silver Strand* ha sido poco estudiada de manera independiente, ha sido tomada como parámetro para





modelar escenarios de daño en la Ciudad de Tijuana, como el caso de la Microzonación Sísmica de Tijuana (2009).

Antes de terminar la caracterización de los sistemas de fallas que se ubican al norte de la región, es importante mencionar que, de acuerdo con algunos autores como Cruz (2002), los sistemas que se encuentran en el sur de región, en específico el caso del Sistema San Miguel-Vallecitos-Calabazas, se consideran como una continuación al sureste de la Falla *Rose Canyon-Inglewood-Newport*. En el mapa de lineamientos geológicos regionales es posible observar la representación de las fallas Calabazas y Vallecitos, las cuales se describen a continuación. La falla San Miguel será descrita a razón de que forma parte de este sistema activo aunque no es visible en el mapa.

Falla San Miguel

Raines *et al* (1991) señalan que la zona de falla de San Miguel es la más activa en el Norte de Baja California desde el punto de vista sísmico. A pesar de que la tasa de deslizamiento no ha sido delimitada de manera precisa, de acuerdo a datos geológicos parece ser baja, sin embargo, en conjunto con las fallas que ya han sido descritas, domina las condiciones de riesgo sísmico para Tijuana.

En una recopilación de parámetros realizada por Anderson *et al* (1989), así como Lindvall y Rockwell (1991) se propone que la longitud estimada de esta falla es de 100 km, con una velocidad de deslizamiento de 1 mm por año. Así mismo estiman que en caso de ruptura podría generar un sismo de magnitud de hasta $M=7$.

Autores como Cruz (2002) han profundizado más en el estudio de las características o parámetros de esta falla; el ya mencionado autor plantea que se trata de una estructura de desplazamiento lateral derecho, a diferencia de los autores ya citados, el propone una velocidad de deslizamiento de 0.1-3 mm por año. No estima una magnitud específica en caso de rompimiento, sin embargo cita dos temblores ocurridos en 1954 de magnitud $M=6$ y $M=6.3$, así como tres de 1956 con magnitud local $M_L=6.3-6.8$.





Falla Calabazas

Existe poca información referente a esta falla, lo cual, de acuerdo con Ibarra *et al* (2009) puede deberse a que se pierde su rastro al llegar al sur de la Ciudad de Tijuana. Al respecto, Cruz (2002), también concuerda en que la localización de esta falla está poco definida, solo menciona que es una falla dextral con algunas expresiones geomorfológicas como escarpes, escalones y crecimiento de depósitos aluviales.

No se encontraron parámetros de velocidad de deslizamiento ni magnitud de sismos en caso de la ruptura de esta falla, sin embargo, la relación que guarda con otras fallas al norte y por formar parte del sistema más activo del norte de Baja California justifica la pertinencia de considerarla como una fuente de peligro.

Falla Vallecitos

La falla Vallecitos no presenta actividad clara que se haya registrado en el Holoceno, lo cual sugiere que tiene largos intervalos de recurrencia (Raines *et al*, 1991). El mismo autor estima que este lineamiento posee una extensión de alrededor de 75 km, con una velocidad de deslizamiento de 1 mm al año y con la posibilidad de generar un sismo de hasta $M=7$.

De manera contraria a lo que estima el autor anterior, Cruz (2002) plantea que, a esta falla no se le han asociado sismos de magnitud cercana a $M=6$ ni presenta microsismicidad. Sin embargo, hace dos aseveraciones que le dan cierto grado de peligrosidad para el caso del área de estudio, la primera es que es la continuación de la Falla San Miguel, que recordemos es considerada de las más activas del norte de Baja California, la segunda razón de la peligrosidad que puede representar es que existe la posibilidad de que pase por debajo de la Ciudad de Tijuana, aunque en el mapa generado, de forma aparente desaparece varios kilómetros antes de llegar a ésta.

En conclusión al tema de los lineamientos geológicos que son fuentes potenciales de peligro para la zona de estudio, se puede señalar que, la Zona Urbana de Tijuana por localización geográfica está expuesta en gran medida a ser sometida por un sismo que fuera generado por cualquiera de estas fallas descritas. Es importante considerar que también al





interior de la ciudad se tiene registro de fallas, tal como se puede observar en el mapa, que aunque en ausencia de estudios que las cataloguen como activas, vale la pena recordar que la zona de estudio se sitúa en el límite entre dos placas tectónicas y que, a final de cuentas estas fallas geológicas, en conjunto con las fracturas de la corteza que se pueden observar, son resultado de los esfuerzos regionales entre esas dos placas.

Se considera pertinente mencionar que la existencia de estudios que proveen parámetros para el análisis de estos lineamientos, se debe también a la vecindad que tiene la ciudad con los Estados Unidos de Norteamérica, ya que son científicos de esa nación los que han estudiado a éstos dado que también son a fuentes de peligro para su territorio, en específico para el Estado de California.

3.6 Caracterización geotécnica genérica

Esta caracterización se realizó para las tres principales zonas del área de estudio, en relación a como se les conoce en el ámbito local, “Zona Río Tijuana”, “Zona de Otay” y “Zona de Playas de Tijuana”.

La siguiente descripción de las características del subsuelo en algunas partes de la zona Urbana de Tijuana fue realizada con base a la información proporcionada por el Instituto Tecnológico de Tijuana (2002), misma que fue obtenida a través de la consulta de estudios geotécnicos realizados por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos y la Empresa GEOCIM. A partir de dichos estudios es posible conocer el tipo materiales que prevalecen en el subsuelo de la zona de estudio y dan razón de características como la profundidad, tipo y algunas propiedades físicas de los mismos. Se tienen registrados treinta y cuatro estudios geotécnicos (Figura 3.5), de los cuales treinta se localizan en la denominada Zona Río de Tijuana, la cual, es desde el punto de vista geomorfológico, una amplia planicie aluvial que atraviesa toda la ciudad en sentido noroeste a sureste. Dos estudios más se localizan al noreste, en lo que se conoce como Zona de Otay, la cual se sitúa sobre elevaciones de poca altitud constituidas por rocas de origen sedimentario que dieron origen a la formación de conglomerados. Los últimos dos estudios se localizan al noroeste en la zona de Playas de Tijuana, una amplia planicie costera constituida por limolitas y areniscas.



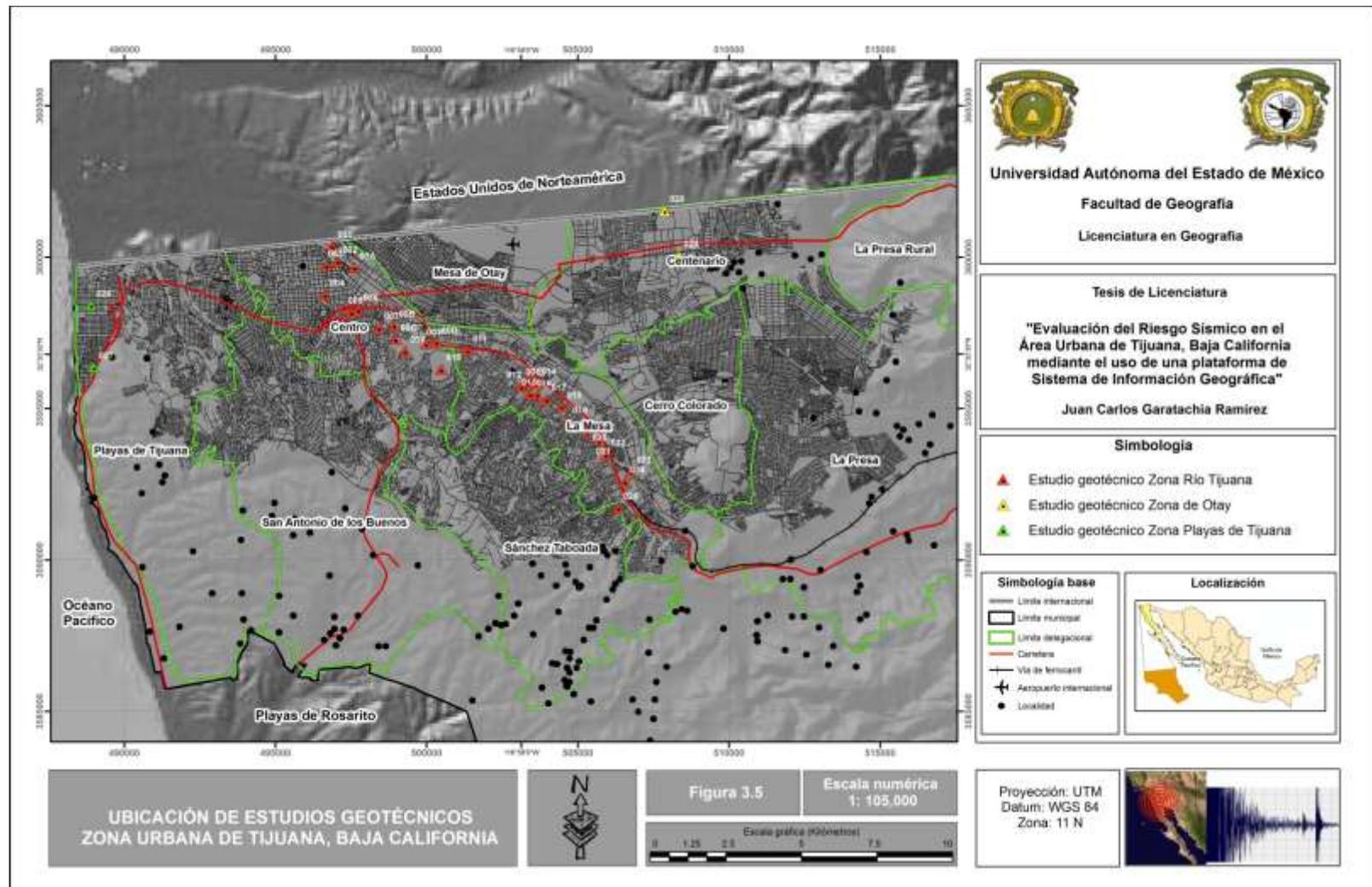


Figura 3.5 Ubicación de estudios geotécnicos en la Ciudad de Tijuana.

“Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Urbana de Tijuana, Baja California mediante el uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica”





Zona Río Tijuana

A través de la amplia planicie aluvial formada por el río Tijuana, es posible identificar una predominante presencia de arenas, que de acuerdo a la descripción de la mayoría de los perfiles realizados en la zona, tienden a ser de grano medio a grueso y constantemente mezclados con arcillas; esta condición geológica es posible de observar hasta los dos metros de profundidad en promedio.

En la siguiente capa del subsuelo es común la aparición de gravas mezcladas con boleos, que en algunos casos llegan a tener diámetros de hasta 24"; cabe mencionar que estos materiales se encuentran empacados en arenas y arcillas, siendo lo anterior una constante en la mayoría de los casos. Esta capa llega a observarse con espesores de hasta tres metros en promedio.

En los siguientes estratos es común encontrar mezclas de arena y arcillas, en ocasiones con presencia de limos, también hay aumento en la compacidad y la presencia de gravas y boleos es también es una constante a medida que se profundiza, dejando notar así que al parecer el subsuelo tiene una secuencia de arenas, seguida por gravas y boleos con arenas y arcillas y así en lo sucesivo. En promedio los perfiles alcanzan profundidades de cinco a seis metros, sin embargo hay excepciones de hasta treinta metros.

Zonta Playas de Tijuana

En esta zona predomina la presencia de arcillas arenosas, en espesores de hasta 30 cm, proseguidas por capas formadas por gravas arcillosas en las cuales es posible encontrar boleos de hasta 7" de diámetro. Esta última capa tiene espesores de hasta 1m y aparecen también incrustaciones de carbonato de calcio.

Zona de Otay

En esta zona es posible encontrar en los primeros tres metros de profundidad capas conformadas por arcillas arenosas de alta plasticidad, seguidos y en ocasiones en la misma capa de arenas gruesas, boleos de hasta 18" de diámetro y gravas, esta capa llega a tener espesores de hasta cuatro metros.





La descripción detallada de los estudios geotécnicos se puede observar en el Anexo 1.

Como ya se ha mencionado, esta caracterización cumple dos funciones en la presente investigación, mismas que responden a dos elementos diferentes pero que se sitúan en el mismo contexto de la evaluación del riesgo. Lo anterior se explica mejor de la siguiente manera; a partir del conocimiento de las condiciones del subsuelo, en relación al tipo de material, así como de sus espesores y profundidades, mismas que varían en función de la ubicación, es posible estimar parámetros de la respuesta sísmica del terreno, uno de ellos, el cual es utilizado en este trabajo, es el período natural de vibración del suelo o período dominante; dicho parámetro por sí solo no representa una variable de peligrosidad, es decir, es necesario que sea relacionada con otra variable, en este caso con las estructuras (edificios y viviendas) para que pueda convertirse en un factor de peligro y en determinado momento incluso de riesgo. De lo anterior ya se ha dado una introducción en el Capítulo I, cuando se habla sobre la dinámica de los sistemas elásticos y el proceso de la resonancia de una estructura.

Dado lo anterior, en los siguientes modelos de evaluación de peligrosidad sísmica no se considera el uso de la caracterización geotécnica.

3.7 Evaluación de peligrosidad sísmica a partir de modelos de intensidades sísmicas

Como ya se ha tratado en el capítulo I, diversos autores convergen en ideas al tratar de definir a la peligrosidad sísmica como la presencia de efectos en el terreno causados por la generación de un terremoto. Pero hay un aspecto fundamental que define a la peligrosidad sísmica, en el que concuerdan autores como Ayala-Carcedo y Olcina (2002) y González de Vallejo (2004) al hablar del peligro sísmico como el rompimiento más o menos extenso de un bloque litosférico, lo que en otras palabras sería la activación de una falla geológica, que de producirse, ha de generar diversos efectos en un espacio y tiempo determinado, así como en diversas intensidades. Dichos efectos pueden presentarse y observarse de desde una manera simple, con la vibración del suelo, hasta el desencadenamiento de procesos peligrosos más complejos, como la licuefacción del suelo o la generación de *tsunamis*. De





Lo anterior se refuerza la idea que asevera que la peligrosidad sísmica es variante y cambiante de acuerdo a las condiciones locales de los sitios por los cuales viajan las ondas sísmicas.

Lo anterior se explica al mencionar que, en la actualidad, los estudios de riesgo sísmico tanto en el ámbito territorial como en el de ingeniería de estructuras, parten de la estimación de la aceleración máxima del terreno (*Peak Ground Acceleration*). Que resulta un parámetro fundamental para el diseño antisísmico como factor de reducción del riesgo, ya que se calcula en función de las características locales del terreno, lo que se conoce como efecto de sitio; sin embargo, dicho parámetro vanguardista, requiere de la inversión de más tiempo y la creación de infraestructura específica.

De acuerdo a la disponibilidad de datos específicos y de alcance que permitan llegar a un nivel de detalle muy específico, se decidió utilizar modelos ya existentes para el área de estudio, sustentados en los trabajos que se realizaron por parte del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, la Dirección de Protección Civil de Baja California y la Dirección de Protección Civil de Tijuana, los cuales constituyen parte de la microzonación sísmica de Tijuana y se encuentran como parte de los resultados de dichos trabajos.

Ambos modelos representan las intensidades sísmicas a las que puede ser sometida el área urbana de Tijuana, conocidos también como mapas de isosistas, a partir de la hipótesis del rompimiento de dos fallas geológicas, localizadas en distintas áreas en la periferia de la ciudad y a diferentes distancias también. Cabe mencionar que las fallas propuestas como fuente generadora de peligro sísmico, poseen características o parámetros diferentes, pero a las dos se les ha asignado como el máximo terremoto que podrían producir una magnitud de $M=6.5$, lo que resulta en que en alguna de ellas se puedan alcanzar intensidades de alto valor y en la otra no tanto, no obstante, estos modelos dejan en claro que no pueden ser tomados como determinantes, ya que no se sabe a ciencia cierta cuál de las dos fallas tendrá un rompimiento, pero si muestran la distribución del peligro en la zona de manera general, por lo anterior debe recordarse que cuando se habla de los riesgos se está hablando de probabilidades.





Otra aspecto que es importante mencionar antes de explicar el uso de estos modelos para el área de estudio de esta investigación, está dado por la metodología utilizada por los creadores, quienes explican que, a partir de métodos predictivos, es posible valorar los máximos movimientos del suelo. Acosta (2009) menciona que, estos métodos se basan en el empleo de ecuaciones predictivas, las cuales han sido generadas a partir del análisis estadístico de registros del movimiento del suelo en alguna región particular; el sentido espacial que maneja el autor en la anterior definición es muy importante y debe considerarse, ya que de este continúa la definición y explica por qué estos métodos son válidos, al decir que, son válidas para ese región que fueron diseñadas, no obstante, suelen ser empleadas en otras regiones con características sismotectónicas similares. Es así que el autor justifica el uso de ecuaciones predictivas desarrolladas por Boore *et al* (1997) y Joyner y Fumal (1985) y las considera como adecuadas para el área de estudio.

De manera general, al utilizar métodos predictivos, el movimiento del suelo depende de tres factores básicos: la fuente, la trayectoria y el sitio. Lo anterior, de acuerdo con Acosta (2007), significa que, la fuente es representada como una función de la magnitud del terremoto, la trayectoria por medio de la atenuación inelástica y la expansión geométrica, mientras que el sitio es representado por medio de funciones de algún parámetro físico del suelo, en este caso, la velocidad de ondas de corte.

El primer modelo se generó a partir de la simulación del rompimiento de la Falla La Nación, con una magnitud máxima considerada de $M=6.5$. Este lineamiento geológico se localiza al norte de la Ciudad de Tijuana a una distancia aproximada de 3 km, y ha sido posible su ubicación y representación solo del lado norteamericano. El modelo generado a partir de este sistema de fallas, presenta Intensidades Modificadas de Mercalli que van desde IV hasta VII. Presentándose las más altas en la zona centro norte de la ciudad, distribuyéndose hacia el sur y no encontrando una intensidad menor a VI en lo que comprende el área urbana de Tijuana. Si se sobreponen los resultados que muestra este modelo con los materiales litológicos que se sitúan en la superficie del área de estudio (ver mapa geológico) se puede observar que existe una relación entre éstas, ya que las intensidades mayores se localizan casi en las mismas zonas dónde el basamento es de rocas





de tipo sedimentario, en específico se pueden ver, intensidades de VI y VII sobre areniscas, depósitos aluviales, conglomerados y asociaciones de arenisca-conglomerado.

Intensidades de VI se observan aún en rocas sedimentarias, sin embargo, comienza la transición hacia rocas ígneas, para finalmente llegar a intensidades de V y menores en zonas dónde el tipo de roca es de origen ígneo como andesita, basalto y granito.

El modelo generado a partir del supuesto rompimiento de la Falla La Nación, ha sido tomado como base de peligrosidad sísmica para la evaluación de escenarios de desastre en esta ciudad, tanto por instancias gubernamentales como por educativas como el caso del Colegio de la Frontera Norte.

El siguiente modelo fue generado a partir de la hipótesis del rompimiento de la Falla *Silver Strand*, la cual se localiza a una distancia aproximada de 3 km al noroeste de la Ciudad de Tijuana en el Océano Pacífico y ha sido caracterizada, como ya se ha explicado en párrafos anteriores, para generar un sismo de magnitud hasta de $M=6.9$, sin embargo, para la realización del modelo de intensidades sísmicas en la microzonación se le asignó una magnitud de $M=6.5$.

Existen diferencias significativas entre el modelo de la Falla La Nación y la Falla *Silver Strand*, una de ellas es que, la energía que liberaría un terremoto causado por el rompimiento esta falla podría generar intensidades modificadas de Mercalli de hasta IX y X, lo cual se puede atribuirse a que la ondas sísmicas pegarían de lleno del lado oeste de la ciudad, donde se localiza la costa y se encuentran los materiales litológicos más suaves de la zona de estudio, aunado también a que la distancia a la fuente es más corta. Otra diferencia que se puede observar para este modelo es que, la distribución de las isosistas se presenta en un sentido oeste a este formando una especie de barras verticales, dicho así por describirlas en un estricto sentido gráfico; en este modelo, prácticamente la intensidad sísmica disminuye a medida que se aleja de la fuente emisora de energía, no encontrando en esas zonas una relación tan directa entre el tipo de roca y el nivel de agitación al que sería sometida la zona urbana en caso de que se presentara el terremoto.





Recapitulando la interpretación de los dos modelos de intensidades sísmicas anteriores, es posible determinar que, el hecho de utilizar solo uno para tomarlo como base de peligrosidad sísmica, deja abierta la posibilidad a la suspicacia, ya que para ambos la distribución de las isosistas puede parecer muy uniforme, por esta razón, se consideró que, una adecuada modificación a ambos, en la acción de unificarlos, permitiría tener una visión más amplia de los niveles de peligrosidad sísmica a los que puede ser sometida la ciudad de Tijuana, y teniendo muy claro que, se trata de un probabilidad, ya que a ciencia cierta no se sabe cuál de las dos fallas romperá, pero sí sabiendo que el peligro es inminente, se unificaron los dos modelos y se les asignó el valor de intensidad promedio que presentan ambos, generando así uno nuevo, que si bien, no llega a tener tanto el límite inferior ni el límite superior de intensidad sísmica que presenta uno y otro modelo, si conserva la esencia de cada uno y aun así presenta valores, que ya en un caso real son altos.

El mapa de intensidades sísmicas del área urbana de Tijuana (Figura 3.6) muestra que, en la parte noroeste, justo en el borde continental, la intensidad a la que podría ser sometida el área de estudio podría ser de hasta IX en la escala modificada de Mercalli, incluso siguiendo una delgada franja vertical en sentido norte sur es posible observar este mismo valor de intensidad; lo anterior, en primera instancia se puede deber a la cercanía que existe en relación a la falla *Silver Strand*, que es una de las fuentes precursoras de energía. Sin embargo, también se puede identificar una relación entre este valor de intensidad y el tipo de material litológico, ya que, si se sobrepone con el mapa geológico, se puede observar que, la esquina representada con intensidad IX coincide con un tipo de roca sedimentaria, en específico es una asociación de limolita y arenisca; es importante recordar que las ondas sísmicas se amplifican al viajar por rocas blandas como en este caso. La franja vertical que se distribuye hacia el sur, no es tan extensa de manera horizontal, ya que se presenta sobre una roca de tipo ígnea extrusiva intermedia.



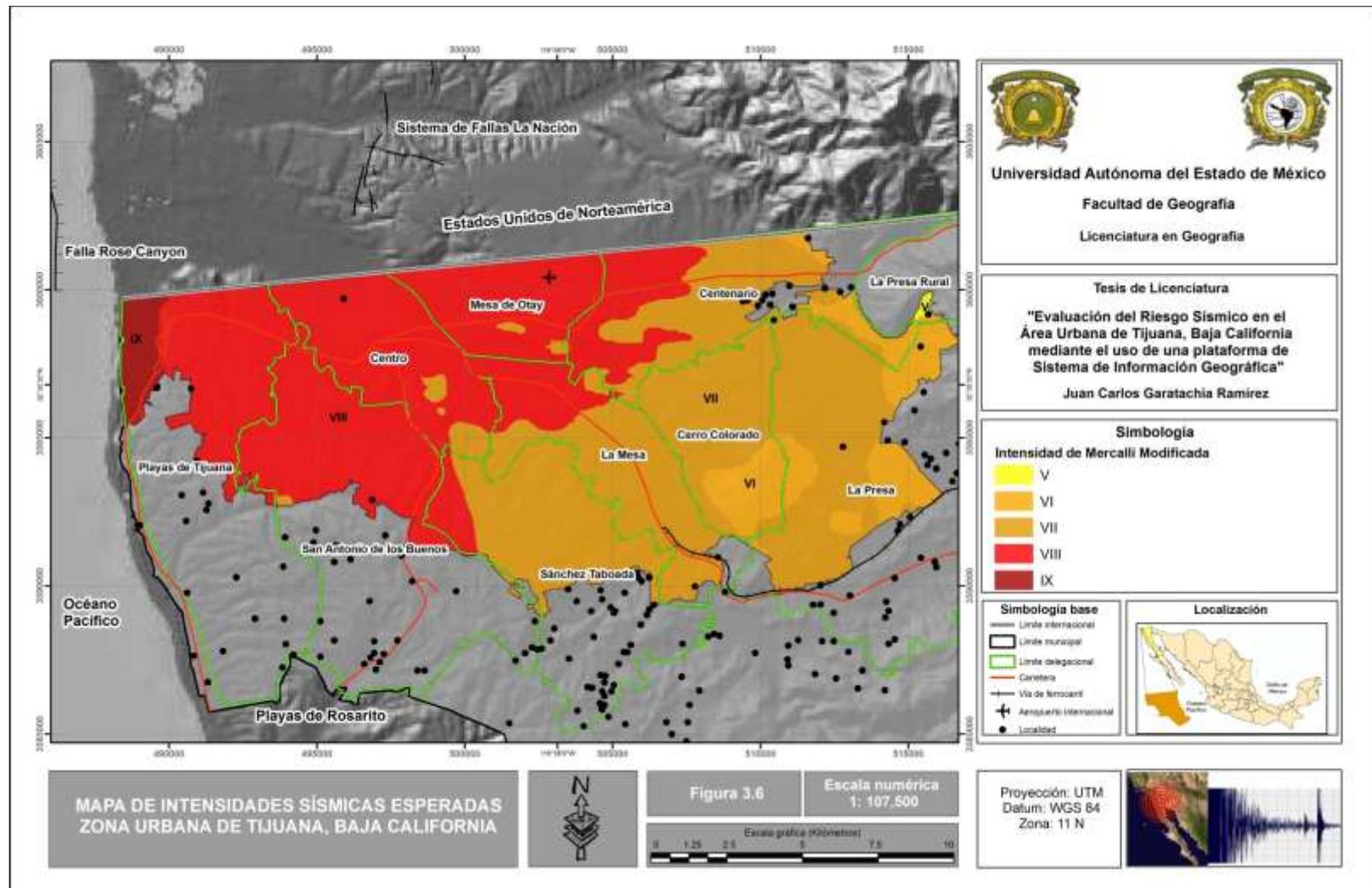


Figura 3.6 Mapa de intensidades sísmicas con probabilidad de presentarse en la zona Urbana de Tijuana a partir del rompimiento de la Falla *Silver Strand* o La Nación.





Después de identificar el valor de intensidad más alto, de manera general, la intensidad sísmica comienza a disminuir en un sentido NW-SE, a medida que se adentra más hacia la zona de estudio en su lado este, sin embargo, un aspecto que se debe resaltar del modelo resultante, es que, la peligrosidad está representada para ambas fallas, por ejemplo, la parte norte, en el límite nacional y extendiéndose hacia el sur, sobre toda la superficie del territorio que se sitúa sobre rocas de tipo sedimentaria, se aprecia la posibilidad de que se presenten intensidades sísmicas de VII y VIII.

Las intensidades sísmicas menores que resultan en el modelo son de VI y V en la escala modificada de Mercalli, dichas intensidades se observan en la parte sureste de la zona de estudio, en la cual predominan las rocas de origen ígneo, al analizar este resultado, se observa que existe una relación directa entre el tipo de roca y la intensidad sísmica y además la disminución de la intensidad a medida que se aleja de la fuente generadora de energía.

La conclusión de este capítulo radica en que, los niveles de peligrosidad a los que está sometida el área de estudio, por sí solos, se pueden considerar como altos, ya que, como ya se ha explicado, se trata de probabilidades, y al no saber cuál de las dos fallas presentará un rompimiento primero, se considera que el modelo propuesto representa de manera aceptable la distribución de la peligrosidad sísmica.

No obstante la aceptación de este modelo, como ya se ha podido observar a través del análisis, los resultados referentes a la intensidad sísmica esperada carecen de un nivel de detalle fino, situación que es causada por la ausencia y/o no aplicación de los estudios de efecto de sitio que permiten conocer la respuesta sísmica del terreno.





CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SOCIOECONÓMICA Y ESTRUCTURAL





4.1 Introducción

El presente capítulo trata sobre el proceso de evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica y estructural en el área de estudio, así como también sobre los resultados obtenidos de dicha evaluación de estas variables. En primer lugar, se aborda lo referente a la vulnerabilidad socioeconómica; se hace un breve recordatorio referente a los conceptos teóricos que dan sustento a esta variable, del mismo modo sobre los insumos metodológicos y técnicos que permitieron la obtención de los resultados, mismos que se presentan en tablas y de manera gráfica mediante mapas. También, se presentan las condiciones de este tipo de vulnerabilidad en el contexto de un resultado general para toda la zona urbana y en lo subsecuente se realiza el análisis a nivel de Área Geoestadística Básica urbana (AGEB).

El segundo apartado de este capítulo aborda la evaluación de la vulnerabilidad estructural, al igual que en la variable anterior, se hace mención sobre aspectos metodológicos y técnicos que permitieron la obtención de resultados, mismos que se presentan en un producto cartográfico, el cual es analizado en relación a la distribución espacial en el área de estudio.

De manera complementaria, se presenta el análisis de exposición, considerado como uno de los factores de riesgo y que en el presente trabajo es abordado mediante la relación de variables de carácter material (escuelas y hospitales) y humanas (concentración de población).

4.2 Vulnerabilidad socioeconómica

Como ya se trató en el capítulo II, la vulnerabilidad socioeconómica es una consecuencia directa del empobrecimiento, el incremento demográfico y de la urbanización acelerada sin planeación (García *et al*, 2006); este mismo autor hace un señalamiento relevante sobre la vulnerabilidad social en el ámbito de los riesgos naturales, al apuntar que a través del tiempo el concepto de vulnerabilidad se ha relacionado de manera estrecha con estudios de pobreza y marginación, sin embargo, menciona que se ha llegado a la conclusión de que la





vulnerabilidad social es aquella propensión que tiene la población de caer, en un momento determinado, en una condición de pobreza y marginación.

Castel (1997), señala que, la vulnerabilidad social es el resultado del incremento en la superposición entre la inseguridad económica y la inestabilidad social. Si a lo anterior se le suma la probabilidad de que ocurra un proceso natural que represente un peligro, en este caso un sismo, que pueda afectar a determinado grupo social, que por sus condiciones mismas de pobreza o cierto nivel de marginación se encuentre expuesto a éste, se ve reforzada la hipótesis de Baró (2013) quien plantea que el riesgo es el resultado de un conjunto de “distorsiones” en la proyección y articulación territorial de las políticas públicas en materia de gestión de los ordenamientos ecológicos locales y la planeación territorial, usos del suelo y gestión de los ecosistemas y cuencas hidrológicas; la anterior hipótesis permite hacer una relación congruente entre las condiciones sociales del grupo expuesto y la interacción con el espacio en el que se desarrollan, el cual es el emplazamiento donde se presenta el proceso natural que se convierte en riesgo.

Para la estimación de este componente del riesgo, en el presente trabajo, se utilizó la metodología para evaluar vulnerabilidad social propuesta por el Centro Nacional Para la Prevención de Desastres (CENAPRED) en 2006, esta fue modificada en razón de la disponibilidad de información existente para el nivel espacial de estudio, que en este caso es el AGEB urbana.

En una primera etapa, la metodología plantea una serie de indicadores de índole socioeconómico, como población, características educativas, acceso a servicios de salud, características de las viviendas y aspectos relacionados al empleo y los ingresos del grupo social; cada uno de estos indicadores tiene cierto peso o es ponderado, para que en conjunto, después de un análisis, den una perspectiva sobre las posibilidades de organización durante un desastre y de recuperación después de éste, lo que en otras palabras sería el grado de vulnerabilidad social.

Cabe mencionar que la metodología, en una segunda etapa, plantea la evaluación de la capacidad de respuesta de la autoridad de protección civil como parte complementaria de la





primera etapa, sin embargo, como parte de la modificación se decidió que la capacidad de respuesta será analizada de manera independiente con la finalidad de tener un elemento más que permita llegar a una mayor aproximación al grado de vulnerabilidad; para lo anterior, se realizó una entrevista con el Director de Protección Civil del Municipio de Tijuana, quién respondió cada una de las preguntas que plantea el cuestionario de la metodología, los resultados de la evaluación de la capacidad de respuesta se pueden observar en el Anexo 2.

En aras de presentar un resultado general del grado de vulnerabilidad socioeconómica que presenta el Área Urbana de Tijuana, se muestran los siguientes cuadros divididos por rubros, que enmarcan, por una parte, el indicador utilizado y el valor que resulta para la zona de estudio así como el valor que le corresponde de acuerdo a la metodología.

De acuerdo a la metodología, uno de los principales indicadores de desarrollo se refleja en el rubro de **salud**, por lo cual es necesario conocer la accesibilidad que tiene la población a los servicios básicos de salud, así como la capacidad de atención de los mismos. La insuficiencia de servicios de salud reflejará directamente parte de la vulnerabilidad de la población; para esta investigación se incluyeron dos indicadores:

Rubro: Salud		
Indicador	Valor para la zona urbana	Condición de vulnerabilidad
Médicos por cada 100 habitantes*	1.17	Muy baja
Porcentaje de población no derechohabiente	35.58%	Baja

Tabla 4.1. Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro Salud a nivel de zona urbana.

En el rubro de **educación**, la metodología plantea que, las características educativas influirán directamente en la adopción de actitudes y conductas preventivas y de autoprotección de la población, así mismo, pueden mejorar sus conocimientos sobre fenómenos y riesgos. Se consideraron los siguientes indicadores:





Rubro: Educación		
Indicador	Valor para la zona urbana	Condición de vulnerabilidad
Porcentaje de analfabetismo	2.08%	Muy baja
Demanda de educación básica	95.84%	Muy baja
Grado promedio de escolaridad	9.31	Baja

Tabla 4.2. Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro Educación a nivel de zona urbana.

En relación con los desastres de origen natural, la **vivienda** es uno de los sectores que recibe mayores afectaciones. Los daños a la vivienda resultan ser, en algunos casos, uno de los principales parámetros para medir la magnitud de los desastres. La vulnerabilidad de una vivienda, en una de sus tantas facetas, se reflejará tanto en los materiales de construcción, como en los servicios básicos con los que cuenta o de los que carece, los indicadores de este rubro son los siguientes:

Rubro: Vivienda		
Indicador	Valor para la zona urbana	Condición de vulnerabilidad
Porcentaje de viviendas sin agua entubada	2.48%	Muy baja
Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje	1.87%	Muy baja
Porcentaje de viviendas con piso de tierra	3.60%	Muy baja

Tabla 4.3. Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro de Vivienda a nivel de zona urbana.

Los indicadores de la condición de **empleo e ingresos** se refieren principalmente a una situación vulnerable tanto en el plazo inmediato, donde la condición de vida es precaria y las familias de bajos ingresos solo pueden atender sus necesidades inmediatas, y en el largo plazo, se reflejaría en cuanto a la capacidad de prevención y respuesta que potenciaría la vulnerabilidad en caso de un desastre. Se desarrollaron los siguientes indicadores:





Rubro: Empleo e ingresos		
Indicador	Valor para la zona urbana	Condición de vulnerabilidad
Razón de dependencia.	48.31	Muy baja
Tasa de desempleo abierta.	5.34	Baja

Tabla 4.4. Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro de Empleo e Ingresos a nivel de zona urbana.

En el rubro de **población** solo se consideró el aspecto relacionado a los grupos étnicos, los cuales, de acuerdo a la metodología, sus condiciones de vida se asocian a diferencias culturales y sociales, y que a su vez representan uno los grupos más marginados del país.

Rubro: Población		
Indicador	Valor para la zona urbana	Condición de vulnerabilidad
Porcentaje de la población de habla indígena.	0.85%	Predominantemente no indígena.

Tabla 4.5. Resultados de vulnerabilidad socioeconómica en el rubro de Población a nivel de zona urbana.

La evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica realizada a nivel de toda la zona urbana muestra que, los grados de vulnerabilidad son bajos en una primera aproximación general. Desde la perspectiva del que suscribe, existía la suposición de que esta variable resultaría alta, ya que la zona de estudio posee una numerosa población; lo anterior aunado a la gran extensión territorial, hace pensar que la distribución y acceso a bienes y servicios públicos de primera necesidad, puede ser en determinado momento deficiente; además de considerar que se trata de una ciudad fronteriza, la frontera más visitada a nivel mundial, es un factor que de alguna manera provoca que la concentración de personas, vuelva inoperable desde el punto de vista gubernamental, la distribución de servicios básicos; sin embargo en esta zona de estudio no es así, habrá que ver el resultado de la variable vulnerabilidad socioeconómica a nivel de AGEB (Área Geoestadística Básica) urbano, mismo que se analiza en la siguiente parte de este capítulo.





4.3 Vulnerabilidad socioeconómica a nivel de AGEB

Esta variable en principio fue ideada para ser obtenida a nivel de manzana urbana, dado que en el último censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geográfica INEGI se presentan resultados a ese nivel de desagregación, sin embargo, durante la realización y aplicación de la metodología surgieron diversos problemas, tal es el caso de la cantidad de manzanas que conforman el área de estudio, alrededor de 20,000 en las cuales es una constante encontrar falta de información, lo cual vuelve inoperable por momentos la obtención de los indicadores.

Por lo anterior se decidió evaluar la vulnerabilidad socioeconómica a nivel de AGEB; el área de estudio que compete a esta investigación está conformada por 403 AGEBs urbanos, ubicándose éstos en la parte noroeste del municipio. La siguiente gráfica muestra la distribución porcentual de dichas unidades espaciales por grado de vulnerabilidad socioeconómica.

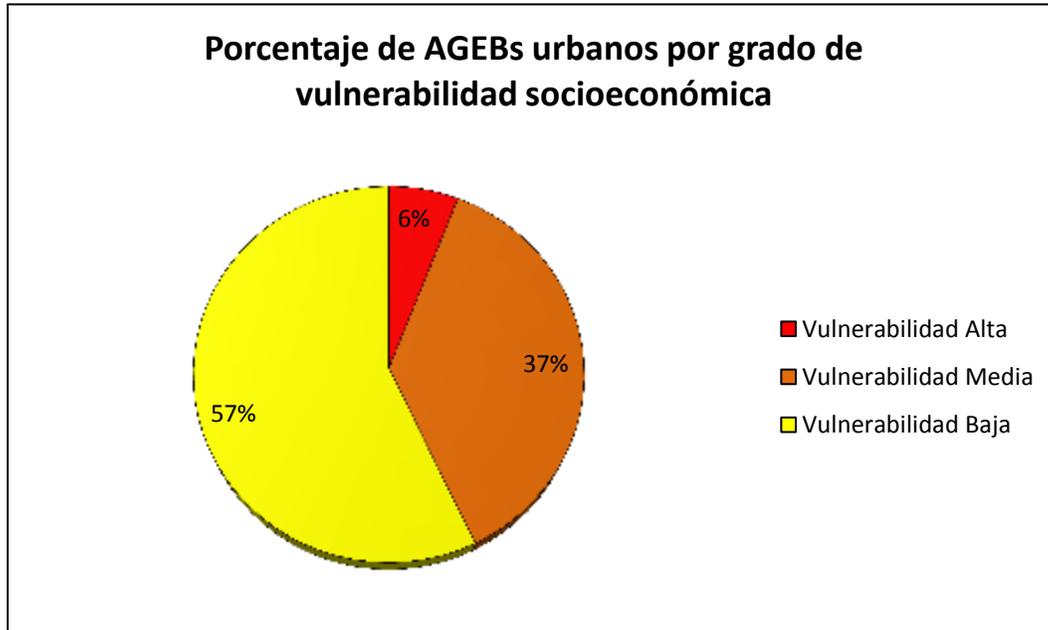


Figura 4.1. Porcentaje de AGEBs urbanos por grado de vulnerabilidad socioeconómica.





Como resultado de esta evaluación se obtuvo un producto cartográfico (Figura 4.2) que muestra la distribución espacial de la vulnerabilidad socioeconómica en el área de estudio, en tres rangos de color, el rojo para el grado de vulnerabilidad alto, anaranjado para el grado medio y amarillo para el grado bajo. Dicho producto es el resultado de la integración de las variables e indicadores, así como su desarrollo y modificación de la metodología propuesta por CENAPRED para evaluar este tipo de vulnerabilidad. Se puede observar la delimitación de las delegaciones municipales con líneas de color verde, mientras que la delimitación de las AGEBs se observa en color gris.



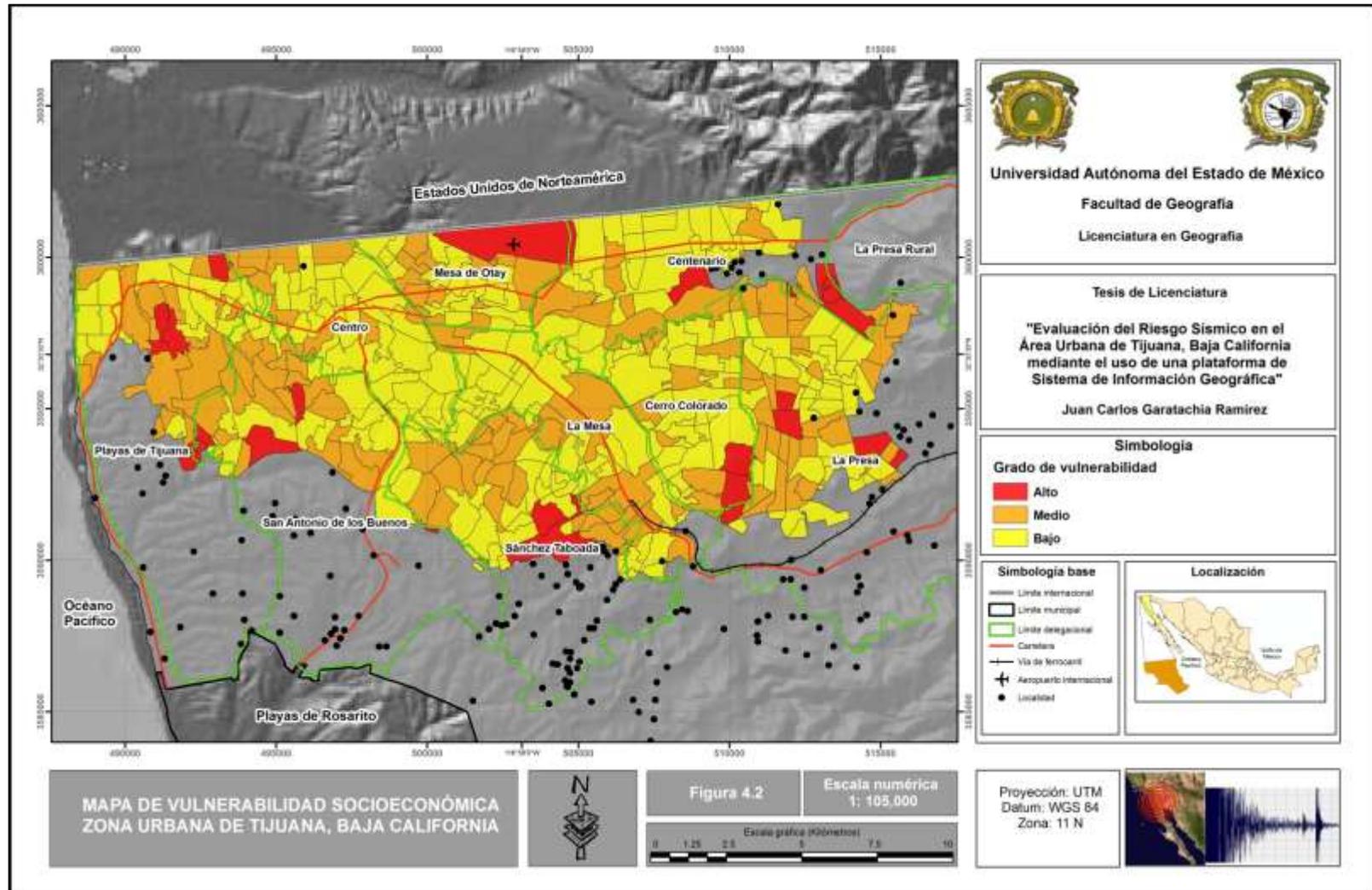


Figura 4.2. Mapa de vulnerabilidad socioeconómica a nivel de AGEB urbano.

“Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Urbana de Tijuana, Baja California mediante el uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica”





El análisis del mapa de vulnerabilidad socioeconómica a nivel de AGEB muestra que solo 24 unidades poseen un valor de vulnerabilidad alto, lo cual representa solo el 6 por ciento de toda el área; dichas unidades se distribuyen en mayor cantidad en las partes limítrofes de la zona urbana, cuatro en la Delegación Playas de Tijuana, tres en la Delegación San Antonio de los Buenos, dos en la Delegación Sánchez Taboada, dos en la Delegación Cerro Colorado, las Delegaciones La Presa y Centenario cuentan con cuatro cada una; en la Delegación Mesa de Otay se observa solo con uno pero de gran extensión, dicha unidad espacial se localiza en las inmediaciones del aeropuerto internacional de la Ciudad de Tijuana, y es en esta parte donde se puede afirmar que el resultado del mapa es cercano a la realidad, puesto que durante algunos recorridos a la ciudad fue posible observar que es justo ahí una de las zonas con mayor densidad de población y las condiciones socioeconómicas no lucen muy favorables para la población. Mención aparte merecen las Delegaciones Centro y la Mesa que no presentan AGEBs con valores altos de vulnerabilidad socioeconómica. La siguiente tabla muestra los valores promedio de los indicadores en AGEBs con alto grado de vulnerabilidad socioeconómica.

Vulnerabilidad Alta			
Rubro	Indicador		
Salud	PM		%PND
	1.17*		40.14
Educación	%A	DEB	GPE
	3.46	63.02	7.1
Vivienda	%VNDAE	%VND	%VPT
	28.68	12.91	15.17
Empleo e Ingresos	RD		TDA
	50.98		8.1
Población	%PI		
	1.3		
<small>PM= Proporción de médicos; %PND= Porcentaje de Población No Derechohabiente; %A= Porcentaje de Analfabetismo; DEB= Demanda de Educación Básica; GPE= Grado Promedio de Escolaridad; %VNDAE= Porcentaje de Viviendas Sin Agua Entubada; %VND= Porcentaje de Viviendas Sin Servicio de Drenaje; %VPT= Porcentaje de Viviendas con Piso de Tierra; RD= Razón de dependencia; TDA= Tasa de Desempleo Abierto; %PI= Porcentaje de Población de Habla Indígena.</small>			





Tabla 4.6 Resultado promedio de los indicadores por cada rubro de la metodología en AGEBs con alto grado de vulnerabilidad socioeconómica.

Como se puede observar en la Tabla 4.5 el primer factor que propicia la existencia de las unidades espaciales con alto grado de vulnerabilidad está referido a la accesibilidad que tiene la población a los servicios de salud, puesto que en promedio, el 40.14% de los habitantes no es derechohabiente de alguna institución de esta índole.

En el rubro de educación, el porcentaje de analfabetismo es bajo, no obstante, la demanda de educación básica con 63.02% indica que el número de población que está en edad de requerir los servicios de educación es alto. El grado promedio de escolaridad con valor de 7.1, indica que la población está en rezago educativo, puesto que han cursado menos de nueve años de educación formal, lo que es equivalente a la educación secundaria, lo anterior, refleja la falta de conocimiento que posee la población en relación a los riesgos y desastres naturales.

Respecto al rubro de vivienda, uno de los factores que da pauta al grado alto de vulnerabilidad está referido al porcentaje de viviendas que no disponen de agua entubada con un 28.68%, en caso de un desastre, la población que ahí habita estará en una situación de desventaja, puesto que la inexistencia de este servicio supone condiciones de insalubridad. Lo mismo ocurre con las viviendas que no cuentan con servicio de drenaje y que tienen piso de tierra, aunque los porcentajes son bajos en lo relativo, dichas viviendas aumentan su vulnerabilidad frente a enfermedades, mismas que se incrementan en situaciones de desastre.

La razón de dependencia, con un resultado promedio de 50.98, muestra que existe un equilibrio el cual se refiere a la proporción de población que tiene entre 0 y 14 años y mayor de 65 en relación a la que tiene entre 14 y 65, consideradas como económicamente productivas y con mayor capacidad de responder ante un desastre, sin embargo, la tasa de desempleo abierto es alta, lo cual incide directamente en la capacidad de consumo y de adquisiciones bienes de la población, aunque se encuentre en edad productiva.





En el caso de la población, tanto en este grado de vulnerabilidad como en los otros dos, dados los resultados, se considera a la población del área de estudio como predominantemente no indígena.

La siguiente imagen da una perspectiva de un territorio con alto grado de vulnerabilidad socioeconómica, se puede observar la ausencia de calles pavimentadas, lo que supone la inexistencia de servicios como el drenaje y el agua entubada.



Figura 4.3. Zona con alta vulnerabilidad socioeconómica. Delegación San Antonio de los Buenos.

El grado medio de vulnerabilidad socioeconómica, representado en el mapa con color anaranjado ocupa el segundo lugar en cuanto a predominancia se refiere en la zona de estudio, con 149 AGEBs que poseen este valor, refiere el 37 por ciento de la ciudad; este grado de vulnerabilidad está presente en la mayoría el área urbana, siendo la Delegación la Presa, ubicada al sureste de la ciudad la que cuenta con más unidades de este grado, le sigue la Delegación San Antonio de los Buenos y Playas de Tijuana, que a pesar de contar con menos unidades con este grado, éstas son de mayor extensión territorial. Un aspecto que se puede resaltar aquí es que, como se puede observar en el mapa, valores medios de





este tipo de vulnerabilidad se presentan en la zona de frontera, a dicho territorio se le conoce como “La Línea”, algunos muy específicos como los que se observan en la Delegación Centro y la Delegación Mesa de Otay, muy cercano o incluso en las inmediaciones de las garitas de cruce, las cuales son puntos estratégicos para el funcionamiento de la ciudad. La siguiente tabla muestra los valores promedio de los indicadores en AGEBs con grado medio de vulnerabilidad socioeconómica.

Vulnerabilidad Media			
Rubro	Indicador		
Salud	PM		%PND
	1.17*		36.71 %
Educación	%A	DEB	GPE
	2.42	78.39	8.4
Vivienda	%VNDAE	%VND	%VPT
	3.92	3.34	4.72
Empleo e Ingresos	RD		TDA
	48.36		6.5
Población	%PI		
	1.03		

PM= Proporción de médicos; **%PND=** Porcentaje de Población No Derechohabiente; **%A=** Porcentaje de Analfabetismo; **DEB=** Demanda de Educación Básica; **GPE=** Grado Promedio de Escolaridad; **%VNDAE=** Porcentaje de Viviendas Sin Agua Entubada; **%VND=** Porcentaje de Viviendas Sin Servicio de Drenaje; **%VPT=** Porcentaje de Viviendas con Piso de Tierra; **RD=** Razón de dependencia; **TDA=** Tasa de Desempleo Abierto; **%PI=** Porcentaje de Población de Habla Indígena.

Tabla 4.7 Resultado promedio de los indicadores por cada rubro de la metodología en AGEBs con grado medio de vulnerabilidad socioeconómica.

De acuerdo a los resultados promedio en este grado de vulnerabilidad, a diferencia de los primeros AGEBs, los valores de la mayoría de los indicadores tienen una tendencia hacia a la disminución; el primer elemento, referido a la población no derechohabiente a servicios de salud, disminuye a un 36.71 %.

En el caso de la accesibilidad a los servicios educativos, se observa una disminución promedio en porcentaje de analfabetismo, no obstante, el indicador de la demanda de





educación básica presenta un repunte con un 78.39 %, lo cual indica que en estas unidades espaciales mayor número de personas requieren de instrucción básica.

Los valores del rubro de servicios básicos en las viviendas disminuyen de manera considerable en sus tres indicadores, lo cual indica que ante una situación de desastre, las unidades espaciales que poseen estos resultados promedio estarán en mejores condiciones de afrontar a situación, puesto que la posibilidad de presentarse enfermedades por condiciones de insalubridad es baja.

En lo que se refiere al rubro de empleo e ingresos, lo valores resultantes disminuyen, lo cual, propicia que menor número de población se considere como dependiente de personas económicamente activas, con lo cual existe mayor capacidad de enfrentar una situación de desastre, lo mismo ocurre con la tasa de desempleo, con un valor promedio de 6.5 indica que la población que habita en ese tipo de AGEBS posee mayor capacidad de adquisición de bienes.

El grado bajo de vulnerabilidad socioeconómica, predomina la mayor parte de las delegaciones de la ciudad, representa el 57 por ciento del área de estudio. Como ya se anticipaba al inicio de este capítulo, al hacer la primera aproximación a la evaluación de esta variable en toda la zona urbana, los resultados de los indicadores y de acuerdo a su valor en la metodología son relativamente bajos, como se puede observar en las primeras tablas de este capítulo, los valores oscilan entre muy bajo y bajo, lo mismo se ve reflejado en la distribución de este grado de vulnerabilidad. Este se concentra en la parte central de la ciudad, lugar donde se ubican los principales corredores comerciales y sitios de interés, Delegación Centro, Mesa de Otay y porción norte de la Delegación La Mesa. En la Delegación Centenario se observa también una considerable extensión territorial con este grado de vulnerabilidad.

La siguiente tabla muestra los valores promedio de los indicadores en AGEBS con bajo grado de vulnerabilidad socioeconómica. Estas unidades espaciales representan el 57 % del área de estudio.





Vulnerabilidad Baja			
Rubro	Indicador		
Salud	PM		%PND
	1.17*		30.48
Educación	%A	DEB	GPE
	1.34	73.96	9.91
Vivienda	%VNDAE	%VND	%VPT
	1.11	0.86	2.27
Empleo e Ingresos	RD		TDA
	45.84		3.94
Población	%PI		
	0.63		

PM= Proporción de médicos; **%PND=** Porcentaje de Población No Derechohabiente; **%A=** Porcentaje de Analfabetismo; **DEB=** Demanda de Educación Básica; **GPE=** Grado Promedio de Escolaridad; **%VNDAE=** Porcentaje de Viviendas Sin Agua Entubada; **%VND=** Porcentaje de Viviendas Sin Servicio de Drenaje; **%VPT=** Porcentaje de Viviendas con Piso de Tierra; **RD=** Razón de dependencia; **TDA=** Tasa de Desempleo Abierto; **%PI=** Porcentaje de Población de Habla Indígena.

Tabla 4.8 Resultado promedio de los indicadores por cada rubro de la metodología en AGEBs con bajo grado de vulnerabilidad socioeconómica.

La vulnerabilidad baja está determinada en primera estancia, por un valor promedio bajo en el porcentaje de personas que no tienen derechohabencia a servicios de salud con solo el 30.48%, lo anterior indica que en una situación posterior de desastre, la mayoría de las población que habita en estos AGEBs tendrá mayor accesibilidad a servicios médicos que coadyuven en la recuperación.

En el rubro de educación, el porcentaje de analfabetismo disminuye a solo el 1.34 %, mientras que la demanda de educación básica se ubica en 73.96%, a diferencia de lo anterior, el grado promedio de escolaridad aumenta a 9.91, lo cual indica que mayor número de personas han recibido una formación superior a la secundaria, por lo cual cuentan con mejor preparación que les permite entender aspectos relacionados con los riesgos y desastres naturales.





En promedio, solo el 1.11% de las viviendas no disponen de agua entubada, así como solo 0.86 % no disponen de drenaje, lo anterior se complementa con el 2.27 % que tienen piso de tierra, esto disminuye casi por completo las enfermedades por cuestiones de insalubridad.

La población tiene la mayor capacidad económica de la ciudad, puesto que la razón de dependencia es de 45.84 y la tasa de desempleo es de solo 3.94.

4.4 Evaluación de vulnerabilidad estructural

La evaluación de los posibles daños que se pueden presentar ante la ocurrencia de un proceso geológico como lo es un sismo o terremoto, es un tema que, a consideración del que suscribe y a raíz de la experiencia al realizar este trabajo, debe tratarse de manera específica e independiente, lo anterior no significa que debe ser desligado por completo del proceso del peligro sísmico, más bien, este tema en la actualidad sugiere una amplia variedad de métodos de estudio, así como de fuentes de información, mismas que requieren de un mayor grado de especialización dada su complejidad.

En otro orden de ideas, como ya se mencionó en el capítulo anterior, a partir de la caracterización geotécnica genérica y en base a la descripción de cada uno de los estudios geotécnicos y/o de mecánica de suelos realizados en la Ciudad de Tijuana, fue posible tener el conocimiento de cuáles eran las condiciones en el subsuelo de la zona de estudio, en función de los tipos de materiales, espesores y profundidades. Una vez realizado lo anterior se procedió a calcular una función de transferencia genérica para cada una de las principales zonas del área de estudio, la zona Río Tijuana, Mesa de Otay y Playas de Tijuana, la cual da cuenta de la frecuencia de vibración de los suelos sobre los cuales se sitúan dichas zonas; un aspecto importante se resaltar aquí y que ya se ha mencionado con anterioridad es que, la frecuencia de vibración como tal no es un factor de peligro, ya que es una característica propia del elemento en cuestión, por tal razón, es necesario e indispensable relacionarla con otro elemento, que en este caso son las estructuras que se encuentran cimentadas en estos suelos para poder determinar qué tan vulnerables son ante una carga sísmica. En términos más específicos, aquellas estructuras que posean un valor





de frecuencia fundamental igual o cercano al valor del suelo tendrán mayor probabilidad de entrar en resonancia y por consecuencia de sufrir más daños e incluso colapsar por completo.

Como tal, los valores obtenidos a través de la función de transferencia, no representan una variable de vulnerabilidad, ni mucho menos de peligrosidad, así que el siguiente paso fue, identificar la mayor cantidad posible de estructuras, mediante el conteo del número de plantas o niveles, se calculó el período de vibración. En la Zona Río se identificaron 135 estructuras, que van desde 2 hasta los 30 niveles, obteniendo así períodos desde 0.2 a 3 segundos. Para las demás zonas se utilizó la información generada por el Colegio de la Frontera Norte, en la cual ubican de manera puntual 547 estructuras de hasta 9 niveles, a los cuales se les calculó también el período de vibración. Esta información fue base para complementar el análisis de esta variable mediante la extrapolación en otras áreas de la ciudad.

En lo que compete al desarrollo de esta variable, el primer paso, una vez calculados los períodos naturales de vibración, tanto del suelo como de las estructuras identificadas fue interpolar ambos elementos en base al resultado de dicho cálculo. Como primer resultado se obtuvo un mapa de isoperíodos del terreno de la zona urbana de Tijuana (Figura 4.4) seguido de la interpolación de las estructuras de acuerdo a su período de vibración.

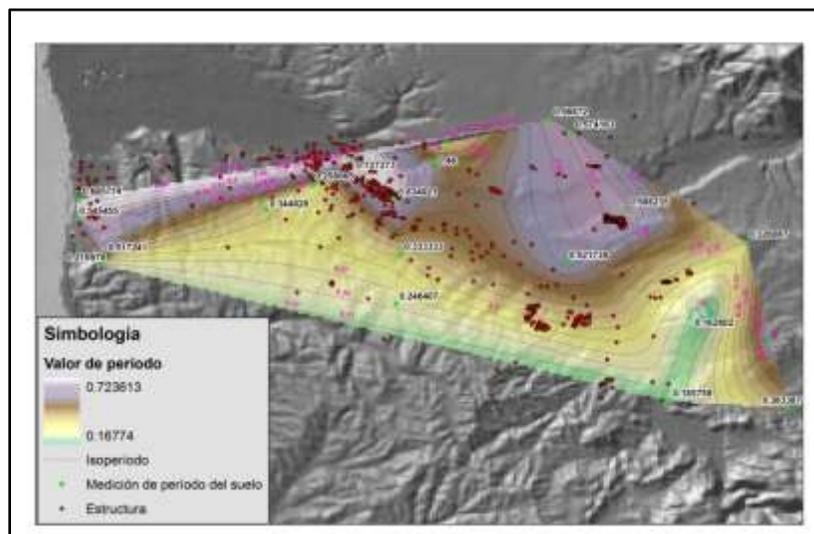


Figura 4.4. Interpolación de los períodos dominantes del suelo.





Una vez realizado lo anterior se procedió a la identificación de períodos similares tanto del suelo como de las estructuras, ya que es en ese caso cuando las estructuras son más vulnerables ante las excitaciones sísmicas. Lo anterior basado en la identificación de la región de respuesta máxima que propone Basan y Meli (2002).

En lo que respecta al análisis de los resultados de esta variable, se obtuvo un producto cartográfico (Figura 4.5) en el cual se puede observar que, el grado de vulnerabilidad más alto se distribuye en la parte noroeste, centro y noreste. Si lo anterior se relaciona con la geología superficial, se puede notar que se trata de las zonas donde hay predominancia de rocas de tipo sedimentario, conglomerados, areniscas y depósitos aluviales, lo cual en principio ya hace pensar la posibilidad de experimentar mayores amplificaciones de las ondas sísmicas. En el caso de las condiciones geotécnicas de dichas zonas, la siguiente tabla muestra la relación que existe entre estas y los resultados de la caracterización general del subsuelo presentada en el capítulo III.

Ubicación en el área de estudio	Ubicación de acuerdo a límite administrativo	Ubicación de acuerdo a la zona geotécnica	Características geotécnicas.
Noroeste	Parte norte de la Delegación Playas de Tijuana y San Antonio de los Buenos.	Zona Playas de Tijuana	Arcillas arenosas de hasta 30 cm. Gravas arcillosas con boleos de hasta 7” en espesores de hasta un 1 m. con incrustaciones de carbonato de calcio.
Centro	Cubrimiento de alrededor del 80% de las delegaciones *Centro, **Mesa de Otay y La Mesa.	*Zona Río Tijuana	Arenas de grano medio a grueso en promedio hasta los 2 m. de profundidad. Gravas mezcladas con boleos de hasta 24” hasta los 3 m. en promedio. Mezclas de arenas y arcillas con aumento de compacidad.
		**Zona de Otay	Arcillas arenosas de alta plasticidad, boleos de hasta 18” y gravas, en promedio hasta 4 m.
Noreste	Delegación Centenario y norte de las delegaciones Cerro Colorado y la Presa.	Zona de Otay	Arcillas arenosas de alta plasticidad, boleos de hasta 18” y gravas, en promedio hasta 4 m.

Tabla 4.9 Zonas con alto grado de vulnerabilidad estructural y su relación con las características geotécnicas.



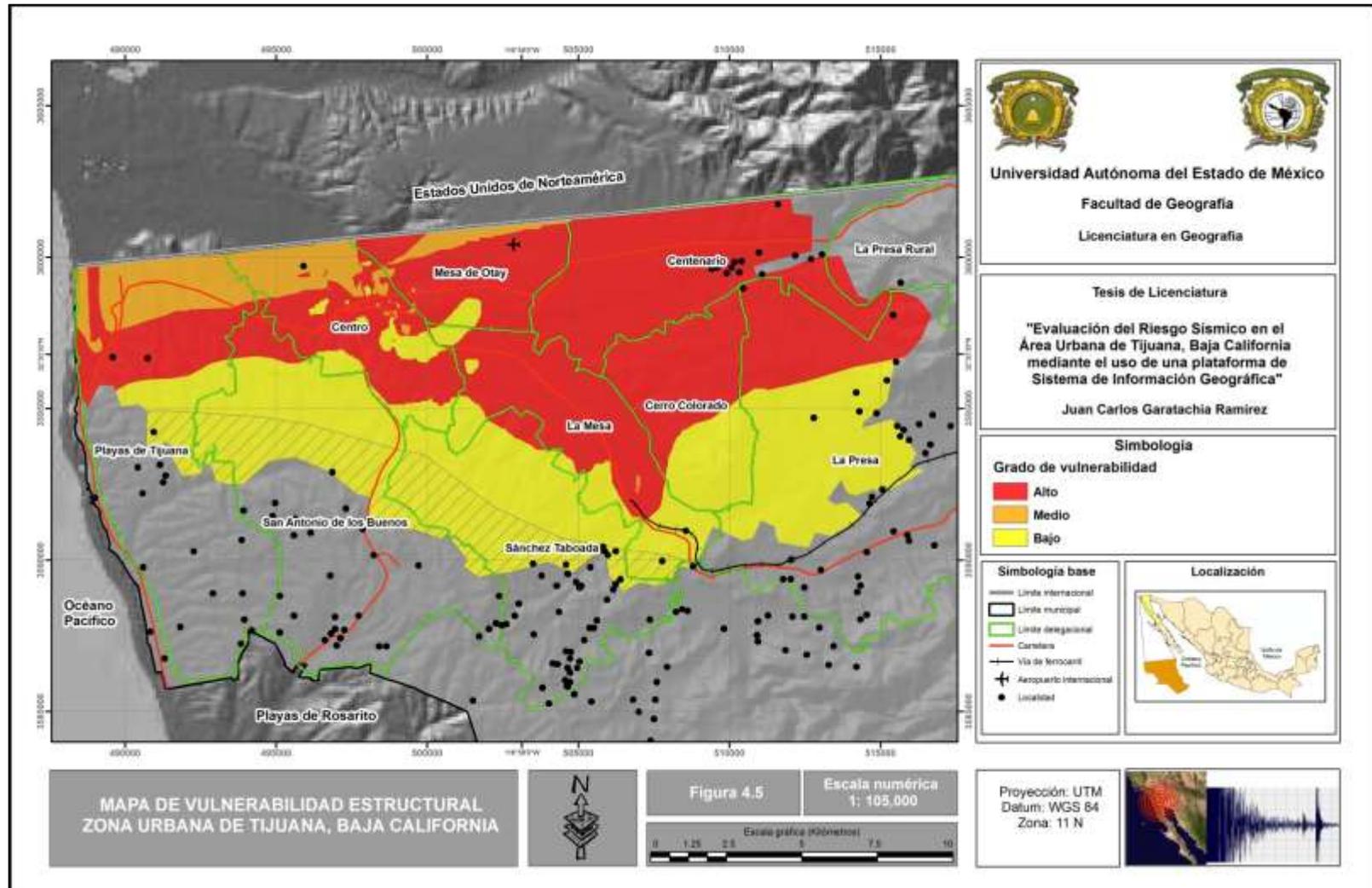


Figura 4.5 Mapa de Vulnerabilidad Estructural del Zona Urbana de Tijuana.

“Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Urbana de Tijuana, Baja California mediante el uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica”





Pero, si lo anterior se relaciona con la estructuras, se puede observar que, por ejemplo en la zona Río Tijuana, existe concentración de edificios de un número de niveles considerable, de los cuales por sus características de vibración en relación con la respuesta del terreno, ha permitido determinar que es ahí una de las regiones de respuesta máxima, es decir, el resultado del cociente se encuentra en el intervalo de 0.7 a 1.2 segundos, el cual recordemos es el menos recomendable en la estructuras. Cabe mencionar que, ese en esa zonas representadas con el grado alto, donde también se localizan algunos de los puntos calculados y que resultaron con los períodos más largos, de 0.5 a 0.7 segundos.



Figura 4.6. Zona Río de Tijuana. Se pueden observar edificios de altura considerable, en zonas con resultados altos de vulnerabilidad estructural.

En la actualidad, uno de los problemas que se presentan en las zonas con alto grado de vulnerabilidad estructural, en especial aquellas que se ubican en los extremos de la ciudad, es la construcción de grandes desarrollos inmobiliarios. Las viviendas edificadas en dichos espacios cuentan con un diseño de construcción, sin embargo, no están en capacidad de





resistir esfuerzos producidos por cargas laterales como los que pueden provocar el paso de ondas sísmicas. Lo anterior se puede observar en la siguiente imagen.

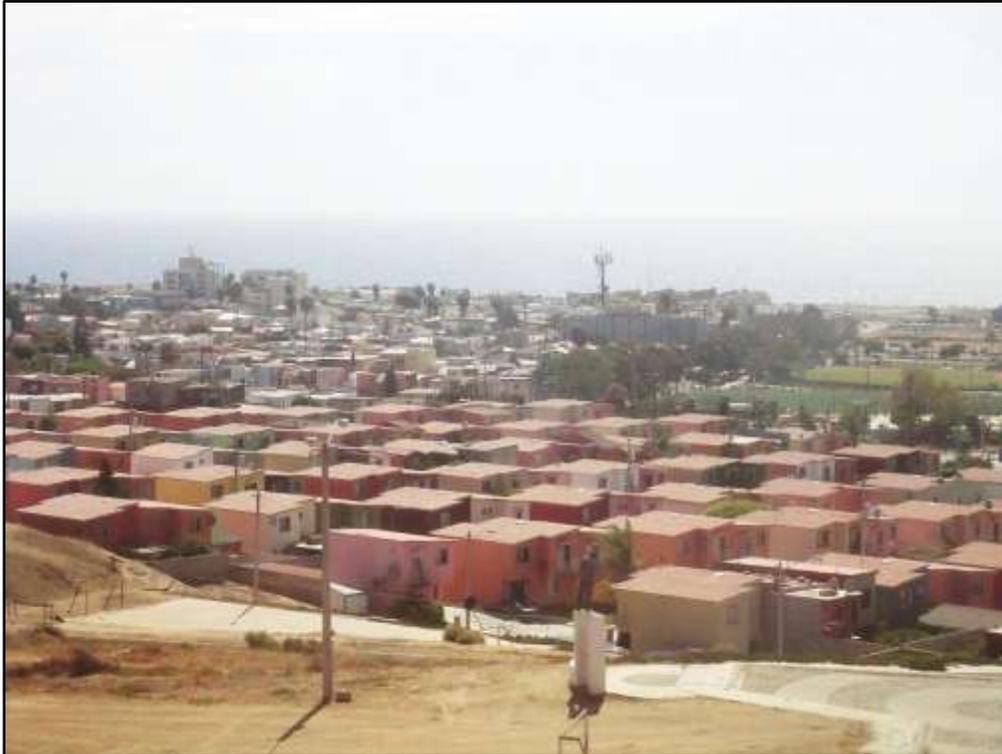


Figura 4.7. Desarrollos inmobiliarios de grandes extensiones construidos en zonas con alto grado de vulnerabilidad estructural. La imagen fue tomada en la Delegación Playas de Tijuana.

El grado medio de vulnerabilidad estructural se observa en la parte norte y noreste de la ciudad, cerca del límite internacional, ahí, los valores del cociente T_E/T_S son menores pero muy cercanos al orden de los 0.6 segundos, por lo cual, dado que no se encuentran dentro de la región de máxima amplificación pero si cerca de ella, se decidió asignar el grado medio, con lo cual se deja abierta la posibilidad de identificar más estructuras que permitan hacer un cociente más nutrido, de tal manera que, tal vez podría acercarse al umbral del grado alto. Desde el punto de vista geológico, las áreas con este grado de vulnerabilidad se ubican sobre rocas de origen sedimentario, tales como asociaciones de limolitas-areniscas, areniscas-conglomerados, depósitos aluviales y conglomerados.

La caracterización geotécnica indica que dichas zonas están conformadas por arcillas arenosas y gravas arcillosas con boleos de hasta 7", lo anterior en lo que compete al área de





Playas de Tijuana, mientras que, en la Delegación Centro, la cual corresponde a la zona geotécnica de Río Tijuana, se conforma por arenas de grano medio a grueso, gravas y boleas de hasta 24”, además de mezclas de arenas y arcillas.

El grado de vulnerabilidad estructural bajo se observa en su mayoría en toda la porción sur de la ciudad, con una pequeña intrusión al norte en lo que es la Zona Río de la Delegación Centro. Este pequeño polígono del cual se habla, aun cuando se sitúa cerca los períodos dominantes del suelo más largos, no encuentra una relación directa con las estructuras para que el resultado de su cociente se ubique en el umbral de máxima respuesta. Otro aspecto al cual se debe que este grado de vulnerabilidad se distribuya con mayor frecuencia en las últimas partes de la ciudad, es que la aparición de estructuras de más de cinco niveles es poco común y predominan las estructuras con un promedio de dos niveles. La siguiente imagen muestra el tipo de vivienda común de la Ciudad de Tijuana.



Figura 4.8 Tipo de vivienda común en la Ciudad de Tijuana. Nótese que la mayoría no superan los dos niveles de altura





Es pertinente mencionar que, tal como se observa en el mapa de vulnerabilidad estructural, una parte del Suroeste de la Ciudad de Tijuana se encuentra achurado con líneas grises, lo anterior obedece a que no se cuentan con puntos de control que midan el período dominante del suelo más allá del que se observa con el símbolo de estrella, por lo cual, aun cuando el resultado de dichas zonas se muestra como de bajo grado de vulnerabilidad, no debe ser considerada esta información como confiable para esa zona en específico.

4.5 Análisis de Exposición

Vale la pena recordar que la exposición es uno de los factores del riesgo, este a su vez está referido a un aspecto de cuantificación, ya sea de bienes materiales o humanos e incluso naturales. Por lo anterior, cuando se decide evaluar este factor, de inmediato se abre la incógnita acerca de qué bienes están expuestos en la zona de estudio y cómo cuantificarlos. De acuerdo a lo que plantean Ayala-Carcedo y Olcina (2002) referente a que la exposición puede variar en función del tiempo y el espacio, se considera que un aspecto que de manera concreta y con certeza puede ser evaluado, gira entorno a tres elementos en específico, el primero de ellos, la población, seguido de las escuelas y los hospitales, los cuales resultan una opción de primera mano al considerarse como estructuras críticas.

Para el análisis de esta variable, se obtuvo un mapa de exposición (Figura 4.9), en el cual se puede observar que en el caso de la población, no existe una distribución espacial que se pueda considerar uniforme, puesto que un análisis visto a nivel de delegación no muestra un comportamiento constante. Lo anterior se ejemplifica con el caso de la Delegación Playas de Tijuana, en la cual se observa una marcada dominancia de unidades espaciales con baja concentración de población, sin embargo en su fracción noroeste aparece uno de las AGEB's con la más alta concentración. Si bien existen algunas unidades con una concentración media, resalta el hecho de que no son uniformes. Se considera importante mencionar aspectos como el anterior, ya que, en determinado momento, la atención de las autoridades puede estar puesta en otros sitios, en caso de seguir el criterio de la cantidad de población al observar mayor diversificación en las unidades espaciales, no obstante, existen casos como éste, en los que en un momento de emergencia pueden ser puntos álgidos en labores de rescate o cuestiones de esa índole.



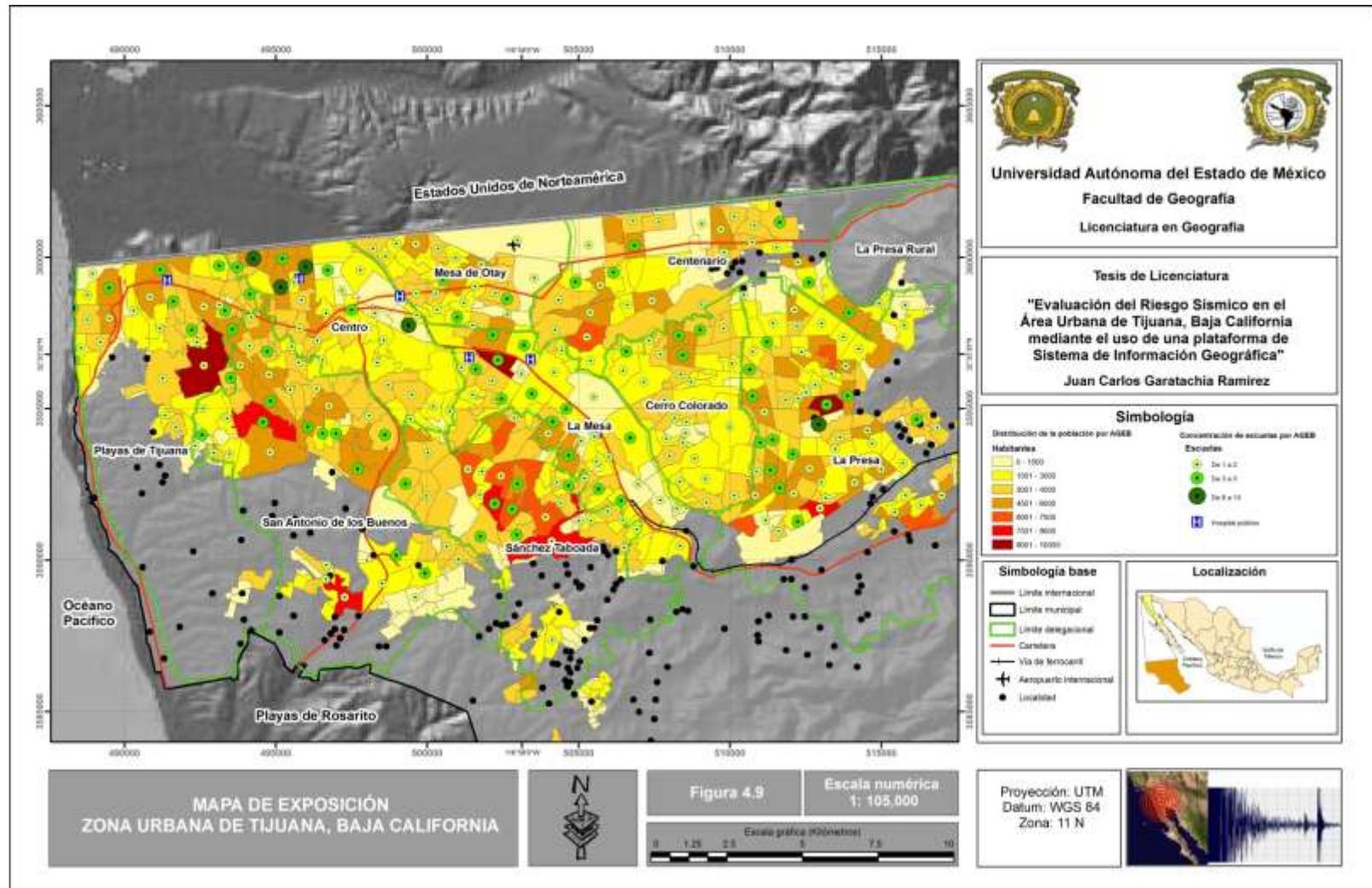


Figura 4.9 Mapa de exposición de la Zona Urbana de Tijuana. Relación de dos variables: La concentración de población por AGEb y la concentración de escuelas.





Un caso similar al anterior se observa también en la Delegación La Mesa, ubicada en la parte central de la Ciudad de Tijuana; esta delegación es un claro ejemplo de correlación de las variables planteadas en este análisis, puesto que, este espacio alberga a tres hospitales, de hecho esta delegación cuenta con el mayor número de este tipo de estructuras críticas, así mismo, se puede observar la presencia de una unidad espacial que se encuentra en el rango de 9001 a 10,500 habitantes, aunado a lo anterior, las demás unidades espaciales se suman al total de la delegación aun cuando su concentración de población es baja; se puede notar también el número de símbolos que representan concentración de escuelas, si bien no aparece un símbolo de los que representan mayor valor, en estricto apego a la cuantificación y considerando sólo el límite inferior de los rangos establecidos, podría decirse que existe la posibilidad de que alrededor de cincuenta escuelas estén situadas en dicha delegación. De acuerdo a las tres aseveraciones anteriores, podría ser la Delegación de la Mesa la que quizá esté más expuesta, no solo ante un evento sísmico, sino también a cualquier otro proceso natural de peligro.

En el caso de la Delegación Centro, a pesar de que no presenta unidades espaciales que se encuentren en los rangos más altos de concentración de población, se puede considerar que su nivel de exposición es alto, ya que si toman en cuenta las otras variables expuestas se puede observar que, en relación a las escuelas, es en esta delegación donde se ubican los AGEB's con mayor concentración, lo anterior se puede observar al Norte, muy cerca de la línea fronteriza donde se ubican tres unidades espaciales que albergan símbolos con los valores más altos, es decir, si una vez se consideran los límites inferiores de estos rangos, existe la posibilidad de que en esa pequeña área se tenga la presencia de al menos dieciocho escuelas, aunado a lo anterior se observan también símbolos de media y baja jerarquía distribuidos en casi toda la delegación, por lo que a lo anterior, habría que sumarle tal vez alrededor de veinticinco escuelas más, considerando ya, el símbolo de mayor jerarquía ubicado en la parte centro-oeste de la delegación. Se observa también la presencia de dos hospitales.

Sin duda, dado el anterior análisis tanto para la Delegación de La Mesa como para la Delegación Centro se puede definir que son éstas dos las más expuestas, ya que se conjugan





de manera contundente de forma espacial y cuantitativa las variables representadas en el mapa, además de que por conocimiento propio del que suscribe se ha observado que es en esa parte de la ciudad en la cual se desarrollan las actividades cotidianas que sirven de sostén para la sociedad tijuanaense; dichas delegaciones conforman casi en su totalidad lo que es llamado por la gente como Zona Río de Tijuana, una zona que además es un punto de atracción de la ciudad.

Se podría esperar que la Delegación Mesa de Otay tuviera un nivel de exposición alto, tanto por su ubicación y otros factores de su funcionamiento dentro del sistema social, como lo es el hecho de que en ese espacio se ubique una de las garitas de cruce en la frontera hacia los Estados Unidos de Norteamérica, sin embargo, la variable población no muestra una influencia, al no existir unidades espaciales con valores altos, lo anterior aunado a que la mayoría del espacio de esta delegación está ocupado por las instalaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Tijuana “Abelardo Rodríguez”. Esta situación a su vez, en determinado momento puede resultar un elemento en un nivel de exposición un tanto alto, por la cantidad de personas que puede albergar de manera transitoria, sin embargo no se conoce bien a bien una cantidad real. La variable representada por la concentración de escuelas si marca una pauta, ya que aun cuando los símbolos que se observan son de jerarquía alta si se presentan de manera cuantiosa. No se observan hospitales.

La Delegación Centenario, ubicada al Norte de la Ciudad en la zona fronteriza, así como la Delegación Cerro Colorado al sur de ésta, muestran características similares en relación a la exposición, incluso, sería válido decir que características similares también en relación a la Delegación Mesa de Otay, de la que se habló en el párrafo anterior. Se puede observar la constante de unidades espaciales con valores bajos y medios en los rangos de concentración de población, situación que es más evidente en la Delegación Centenario, en la cual se ubican la mayor cantidad de AGEB´s con el rango más bajo, aunado a que al oeste de esta delegación ya no se encuentra urbanizado. Sin embargo, para ambos casos de las delegaciones en cuestión, se puede observar que la constante sigue siendo la aparición de concentración de escuelas en valores bajos y medios pero de manera cuantiosa y que están distribuidos en el territorio casi de manera uniforme.





Un caso un tanto peculiar es el que presenta la Delegación La Presa, ya que, a pesar de que se ubica en el extremo oeste de la ciudad y solo una porción de su territorio es urbano, es contenedor de unidades espaciales dominadas por valores medios y altos respecto a la concentración de población, mismos que se ubican en casi todo el espacio comprendido por la zona urbana de esta delegación. Aunado a lo anterior, la concentración de escuelas es alta; se observan AGEB's que contienen rangos de concentración de centros educativos que van de 1 a 3, distribuidos en la mayor parte del territorio, así como también unidades con rangos de 3 a 5 escuelas sin dejar de considerar una unidad que contiene un rango de 6 a 10, para tener un dato aproximado, se calcula que probablemente en esta delegación pueden existir alrededor de 70 escuelas, siguiendo el parámetro de considerar el límite inferior de los rangos como se ha realizado para otras delegaciones.

La Delegación Sánchez Taboada es otra de las que solo una fracción de su territorio está considerada como zona urbana, sin embargo, al igual que la Delegación La Presa, se observa que aún en un espacio reducido la condiciones de exposición pueden ser elevadas, puesto que la mayoría de sus AGEB's tienen como característica una concentración de población que va en aumento; aunado a la anterior, se acentúa la concentración de escuelas en las unidades espaciales, que tienen los rangos de población más altos.

La última delegación de este análisis es San Antonio de los Buenos, ubicada al Este de la Ciudad a un costado de Playas de Tijuana y la Delegación Centro. Ésta, presenta también un caso de dominancia de unidades espaciales con una concentración media de población, encontrándose incluso un AGEB's con un rango que va desde 7,501 a 9,000 habitantes. Se puede considerar a esta delegación como una de las que poseen mayor extensión territorial, no obstante, la zona urbana se encuentra fragmentada y la mayoría se ubica en la parte norte. Respecto a la escuelas, se observa que las unidades espaciales que poseen mayor concentración se ubican en el fragmento norte, pero en ambos casos es posible identificar la presencia de unidades que poseen los rangos de concentración más bajos, no obstante, como ya se ha mencionado, en muchos casos, estos rangos en conjunto suman y pesan en el nivel de exposición desde el enfoque cuantitativo.





Antes de concluir, es pertinente mencionar que, al momento de realizar el análisis de exposición mediante el producto cartográfico, resulta complicado, tanto por la extensión territorial de la zona de estudio y en específico para el caso de la variable escuelas, la gran cantidad de este tipo de estructuras que se ubican en la Ciudad de Tijuana dificulta su cuantificación.

Por último, para tener una perspectiva general de los niveles de exposición en la zona de estudio se puede decir que un orden descendente las delegaciones Centro, La Mesa y Sánchez Taboada, ocupan los tres primeros lugares, seguidas por un segundo grupo que estaría conformado por las delegaciones de La Presa, Playas de Tijuana y San Antonio de los Buenos; en último lugar con el nivel más bajo de exposición se puede agrupar a las delegaciones Mesa de Otay, Centenario y Cerro Colorado.





CAPÍTULO V

EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL RIESGO SÍSMICO





5.1 Introducción

A continuación se analizan dos modelos de riesgo sísmico resultantes para la Zona Urbana de Tijuana, mismos que son resultado de la evaluación de los componentes del riesgo pero en diferentes vertientes. Así, el primero modelo está planteado sobre la base de la peligrosidad obtenida mediante el uso de modelos de intensidades sísmicas. El segundo de éstos, ignora en cierto momento el enfoque determinista y da paso al uso de la peligrosidad basada en la respuesta sísmica del terreno, misma que como ya se ha explicado, se puede considerar ya como un modelo de riesgo. Sobre el segundo modelo que se propone se realizan diversos análisis referentes a la estimación del riesgo, al considerar variables de índole estructural y humana, mismos que dan a paso a la formulación de conclusiones y recomendaciones.

5.2 Evaluación del Riesgo Sísmico en la Zona Urbana de Tijuana (peligrosidad basada en intensidades sísmicas)

En el análisis de este modelo (Figura 5.1), se puede observar que los niveles de riesgo sísmico siguen un patrón de distribución generalizado; las zonas de riesgo sísmico alto, solo se presentan en la parte norte, con mayor concentración en lo correspondiente al centro de la Delegación Playas de Tijuana y el oeste de la Delegación Mesa de Otay. Se pueden observar pequeñas áreas en las delegaciones Centro, La Mesa y Centenario. Un aspecto importante que se debe resaltar al momento que se habla sobre los niveles de riesgo alto, es que, si se relaciona con el modelo de intensidades sísmicas, se puede identificar una marcada obediencia de la distribución y ubicación de estos niveles en relación a la base de peligrosidad, ya que justo en esas zonas con nivel de riesgo alto, donde se presentan las intensidades más altas de VII a IX. Lo anterior se refuerza con lo que plantea Mezcuca (1982) citado por Ayala-Carcedo y Olcina (2002) quien señala que con este tipo de mapas se puede observar cómo es que la intensidad se amortigua con la distancia, además de que sigue direcciones privilegiadas de transmisión de la energía.



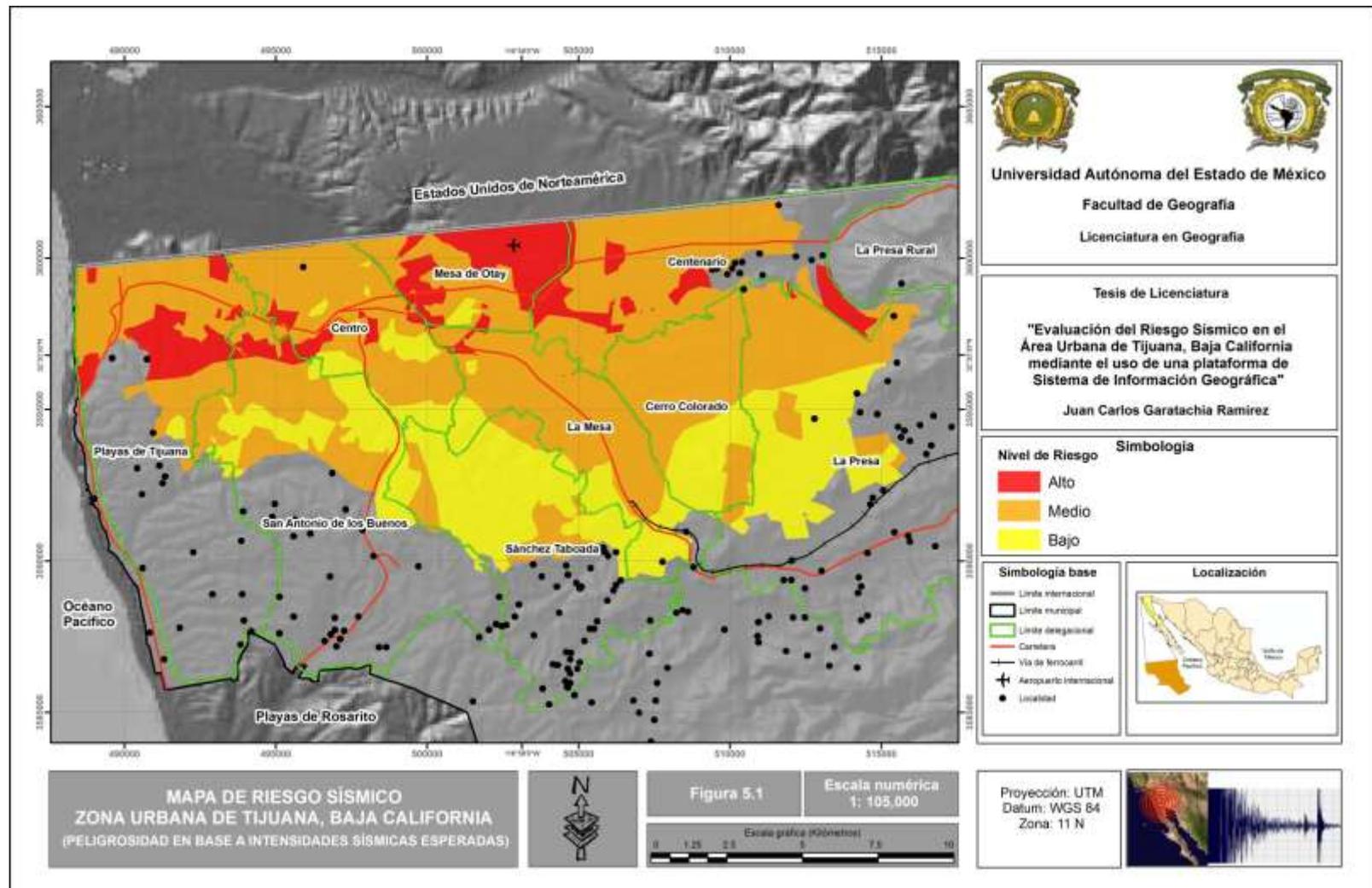


Figura 5.1 Mapa de Riesgo Sísmico en la Zona Urbana de Tijuana. La peligrosidad está basada en el modelo de intensidades sísmicas.



"Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Urbana de Tijuana, Baja California mediante el uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica"



Las aseveraciones citadas en el párrafo anterior se pueden corroborar en este primer modelo de riesgo sísmico en dos vertientes; la primera de ellas que se refiere al amortiguamiento de la intensidad con la distancia se observa de forma clara en el mapa, puesto que los niveles altos de riesgo se ubican y distribuyen en la parte centro-norte y noroeste, de hecho son las zonas donde se ubican las fuentes generadoras de sismos, es decir el Sistema de Fallas La Nación y El Sistema de Fallas *Silver Strand* respectivamente. Fuera de esas zonas, a medida que se recorre hacia el sur y sureste se pueden observar como disminuyen los niveles de riesgo sísmico y en el caso del modelo de intensidades, estas disminuyen también su valor. La segunda vertiente va en relación a lo que los autores señalan como direcciones privilegiadas de transmisión de la energía, para este caso es necesario relacionar tres productos de este trabajo, el mapa geológico, el mapa de intensidades sísmicas y el primer modelo de riesgo sísmico. Con la anterior relación se puede notar que la mayoría de las rocas sedimentarias se ubican en la parte noroeste, centro-norte y un poco al sur en esa misma parte central; son ese tipo de rocas las que dan pauta a que con el paso de las ondas sísmicas, estas se amplifiquen, lo cual da paso a la mayor cantidad de daños. En el mapa de intensidades sísmicas, se observa también que es esas mismas partes donde se presentan los valores más altos, sin embargo, se debe ser cuidadoso en esta última relación, ya que, se notará la generalidad del modelo de intensidades que no respeta en un cien por ciento la geología superficial como ya se ha explicado en otros apartados. La tercera relación se presenta en el modelo de riesgo sísmico, mayores niveles de riesgo se observan en dónde, en primer lugar la geología lo permite, las intensidades sísmicas son altas, pero además, donde también, si se observa el mapa de vulnerabilidad socioeconómica, se ubican AGEBS con valores altos.

La concentración de valores de riesgo medio se presenta con mayor frecuencia en la parte este, lo cual responde a los valores altos de vulnerabilidad estructural, pero también a zonas con valores bajos de vulnerabilidad socioeconómica. Lo mismo ocurre con los valores de riesgo bajo al sur de la ciudad.





5.3 Evaluación del Riesgo Sísmico en la Zona Urbana de Tijuana (peligrosidad basada en modelo de respuesta sísmica del terreno)

El caso de este modelo posee características similares al descrito en el apartado anterior, esto en relación al proceso mediante el cual se obtuvo. Sin embargo, en este modelo, resalta una característica de suma importancia para esta investigación, la cual está indicada en su nombre, es decir, uno de los componentes del riesgo considerado como la base, la peligrosidad, fue obtenida a partir del análisis de la respuesta sísmica del terreno. De manera más específica, se decidió ya no utilizar el modelo de intensidades sísmicas, esto con la finalidad de lograr más detalles a la hora de obtener los niveles de riesgo sísmico. Más bien se utilizó el modelo de vulnerabilidad estructural; al decir esto, surgirá la duda del porque se tomó esta decisión, sin embargo, esto ya ha sido explicado en otros capítulos. No obstante se considera adecuado y pertinente hacer un recordatorio de esta situación.

En el ámbito de los estudios sobre riesgo sísmico, mismos que a menudo y en un orden ascendente se realizan en las zonas urbanas, como resultado de la constante amenaza de este tipo de procesos para la sociedad y el aumento de la infraestructura que poseen dichos territorios, ya no es suficiente sólo contar nada más con un mapa de intensidades sísmicas, puesto que los factores que se acaban de mencionar demandan mayor detalle en la información; sin duda, ese mayor detalle requerido se logra mediante el conocimiento, estudio, evaluación y análisis de aspectos fundamentales como lo es la respuesta sísmica del terreno, la cual precede del conocimiento a fondo de las características del emplazamiento en cuestión, en relación a su geometría, topografía, empacamiento de los estratos, etc. Recordemos que dicha respuesta, como ya se ha mencionado en el marco teórico, puede ser obtenida mediante diversos parámetros, como lo es la Máxima Aceleración del Terreno, conocida en la literatura de habla inglesa como *Peak Ground Acceleration*, la obtención de la Velocidad de Ondas de Corte o bien el Período Dominante del Suelo por citar algunos.

En el caso de esta investigación, la obtención y análisis de los períodos dominantes del suelo fue la opción de primera elección y más viable para llegar a la obtención de los distintos niveles de riesgo sísmico. Sin embargo, antes de proceder al análisis del modelo





resultante con el uso de este parámetro es importante recordar lo planteado por Acosta (2009) quien se refiere a este como el período, medido en segundos de la mayor amplitud del movimiento del suelo. Sin lugar a dudas, este concepto no explica mucho al momento de relacionarlo de manera inmediata con el riesgo sísmico, y en efecto, el período dominante de los suelos por sí solo no puede ser considerado como un ente o fuente de peligrosidad sísmica, ya que debe ser considerado como una característica del terreno en el emplazamiento. No obstante, este parámetro encuentra una estrecha y marcada relación con otros elementos de exposición, tal es el caso de las estructuras que se sitúan sobre dicho emplazamiento, dichos entes al igual que los suelos poseen un período natural de vibración o una frecuencia preferencial en determinados grados de libertad. Esta relación ha sido explicada en el Capítulo I cuando se habla sobre la dinámica de los sistemas elásticos y la resonancia de una estructura, proceso que se da cuando el período de vibración de una estructura coincide con el período dominante del suelo, generando así que la amplitud de vibración de la estructura aumente de forma súbita.

Todo lo dicho en el párrafo anterior, si lo aterrizamos a este apartado da como consecuencia saber que se está en posibilidades de utilizar el modelo de vulnerabilidad estructural al mismo tiempo como un modelo de peligrosidad sísmica, puesto que ya se comentó como la relación y unión de estas dos variables responden a una causa común y permiten entonces, el conocimiento de la respuesta sísmica del terreno, lo cual permite lograr un mayor detalle en la obtención de los niveles de riesgo sísmico. A esto hay que agregar que en el ámbito del riesgo sísmico, una de las vertientes más fuertes está enfocada a la evaluación del riesgo en estructuras, ya que es en esos entes dónde se pueden generar cuantiosos daños, al momento de recordar que además el riesgo es una variable económica. Para acotar mejor este comentario Ayala-Carcedo y Olcina (2002) hablan sobre esta interacción suelo-estructura cuando mencionan que la respuesta sísmica de una construcción excitada por un terremoto es función, por un lado, del movimiento del suelo, dependiente a su vez de las ondas incidentes, y por otro, de algunas características de la construcción.

Mediante la sobreposición del modelo de vulnerabilidad estructural (ahora de peligrosidad) y el de vulnerabilidad socioeconómica se obtuvo el siguiente mapa (Figura 5.2).



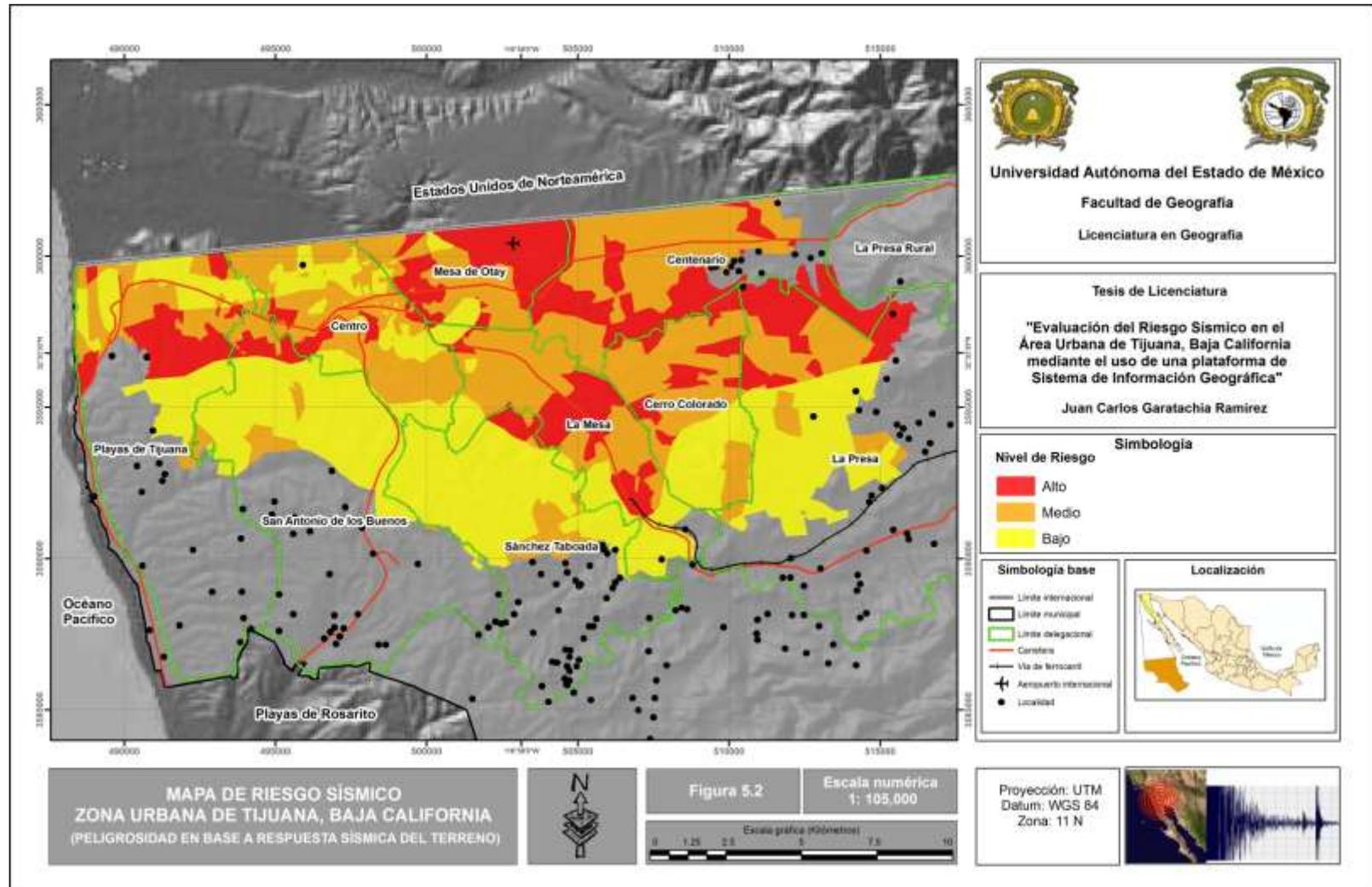


Figura 5.2 Mapa de Riesgo Sísmico en la Zona Urbana de Tijuana. Peligrosidad basada en la respuesta sísmica del terreno.



"Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Urbana de Tijuana, Baja California mediante el uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica"



Si se compara el primero mapa de riesgo sísmico con el que se aborda en este apartado, la primera diferencia que se pueden encontrar es que el segundo modelo presenta una mayor diversificación en cuanto a la distribución y ubicación de los distintos niveles de riesgo sísmico. Esta simple diferencia da al segundo modelo una significativa ventaja en relación al primero, ya que, si analizamos los niveles de riesgo sísmico encontraremos una serie de relaciones que dan certeza a los resultados que presenta.

Al observar los niveles de riesgo alto, se puede notar que éstos se ubican y distribuyen en la parte noroeste, centro-norte, centro-sur y noreste de la Ciudad de Tijuana, lo que en términos de la delimitación administrativa de la ciudad queda de la siguiente manera en orden descendente; la delegación con mayor territorio con riesgo alto es Mesa de Otay, seguida de la Delegación Centenario, en tercer lugar se observa la Delegación Playas de Tijuana, después La Mesa, seguida de La Presa y Cerro Colorado y por último la Delegación Centro.

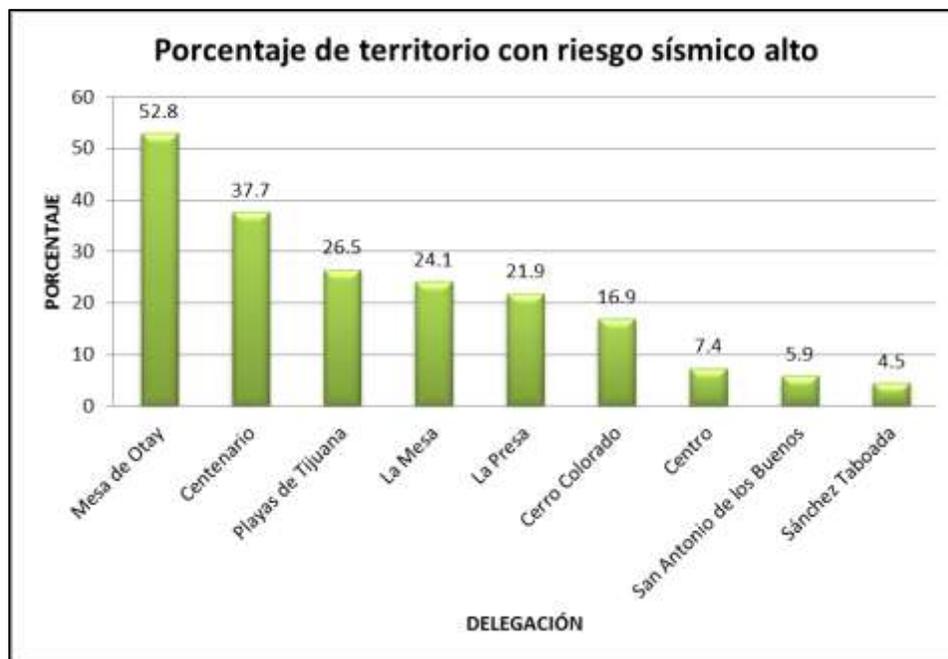


Figura 5.3 Porcentaje de territorio con riesgo alto por delegación. Fuente: En base a mapa de riesgo sísmico.

No obstante de que las delegaciones mencionadas en el párrafo anterior presentan los niveles de riesgo más alto, también es en éstas en las cuales se concentra el nivel de riesgo





medio; lo anterior es de realce ya que si remonta a la base de peligrosidad, representada por el modelo de vulnerabilidad estructural, se puede notar que son los niveles de vulnerabilidad alta, los que ahora dan pauta en gran medida a la existencia de esas zonas con un riesgo medio, y debe recordarse que dicho modelo representa también condiciones de peligrosidad significativa que en determinado momento se pueden convertir también en riesgo como consecuencia de las variables que se utilizaron para su obtención. La razón por la cual, aun cuando el valor precedente es alto el resultante no lo es, se debe a que el grado de vulnerabilidad socioeconómica en dichas zonas no es lo suficiente alto para dar cabida a niveles de riesgo alto.

Es posible notar que en este modelo el nivel de riesgo bajo se presenta en mayor medida en la parte sur de la ciudad, esto es natural ya que la base de peligrosidad presenta el mismo valor, sin embargo, al observar esa misma base se puede notar que zonas como la centro-norte y noroeste presentan valores medios y altos, pero la vulnerabilidad socioeconómica resulta ser predominante baja, lo cual solo da cabida a la aparición de zonas con riesgo bajo y solo algunas con riesgo medio.





5.4 Análisis del Riesgo Sísmico en la Zona Urbana de Tijuana

Con la finalidad de poder concluir el análisis final del riesgo sísmico en la zona de estudio, se tomó la decisión de elegir uno de los dos modelos resultantes de esta investigación, con el fin de verter en él otro tipo de indagaciones y conclusiones más detalladas referentes a los elementos expuestos, una vez ya definidas las áreas de riesgo en la ciudad. Por la tal razón, se eligió el modelo basado en la respuesta sísmica del terreno, puesto que se consideró que tiene suficientes ventajas en comparación con el otro.

Para enfatizar lo anterior, un punto a favor para el modelo basado en la respuesta sísmica del terreno radica en que no depende del modelo de intensidades sísmicas para encontrar e identificar zonas con riesgo sísmico alto, puesto que las intensidades, como ya se ha mencionado en otros párrafos, disminuyen a medida que se alejan de la fuente generadora, lo cual supone que a mayor distancia menor intensidad, lo cual no es del todo aceptable, puesto que esa aseveración surge dado que el modelo realizado para simular el rompimiento de las fallas no toma en cuenta el efecto de sitio, lo cual es un factor de suma importancia y que en el modelo basado en la respuesta sísmica del terreno es considerado cuando se calcula y analiza el período dominante de los suelos a partir de las características geotécnicas. Lo anterior, ha permitido que en este modelo se identifiquen zonas con riesgo alto en donde en comparación con el otro modelo son de riesgo medio y uniformes en su distribución.

Quizá el elemento clave que indica la necesidad imperiosa de utilizar el modelo basado en la respuesta sísmica del terreno y que se debe de resaltar más que algunos otros que no tienen tanto peso, radica en que este modelo, como ya se ha dicho parte del cálculo del periodo dominante del suelo a partir de una caracterización geotécnica, estos datos son valiosos ya que no son dependientes de la ocurrencia de algún sismo específico, más bien la manera en que el emplazamiento se comportaría en caso de alguna excitación sísmica es una característica intrínseca que no podría modificarse aun cuando ocurran sismos con diferentes características; lo anterior indica la utilidad de este parámetro en la zona de estudio, pero siempre y cuando exista la información referente a la otra variable que lo complementa, es decir las estructuras y su periodo de vibración.





No obstante de que ya se ha realizado una evaluación de la exposición en capítulos previos, se considera que para poder concluir con el ciclo de evaluación del riesgo, es necesario, una vez obtenidas las zonas con los niveles más altos, identificar aquellos elementos físicos considerados como líneas vitales (*life lines*), indispensables para el funcionamiento del sistema urbano y social. Dichos elementos, para el caso de esta investigación se refieren a la ubicación de estaciones de bomberos, albergues, gasolineras y gaseras. Así como hospitales y escuelas, mismos que ya han sido considerados en el análisis previo de exposición. Aunado a lo anterior, y aunque existe también un apartado dedicado a la vulnerabilidad estructural, se realiza el análisis de riesgo, considerando información relativa a la calidad de las viviendas, misma que fue generada por el Colegio de la Frontera Norte, para la realización de un escenario de desastre en Tijuana a causa un sismo, dicha información es retomada en esta investigación, con el objetivo de dar el mayor cubrimiento posible en esta temática en la zona de estudio.

5.5 Riesgo sísmico alto en la Zona Urbana de Tijuana y calidad de las viviendas

Tal como lo explican Ayala-Carcedo y Olcina (2002), la vulnerabilidad de las construcciones constituye una característica intrínseca de las mismas que no sólo depende del sistema estructural, sino también de los elementos no estructurales y de otros factores tales como la edad, material y calidad de la construcción. En este sentido, la Escala Modificada de Mercalli plantea una clasificación, basada en factores como los que mencionan los anteriores autores, dicha clasificación es la siguiente:

Mampostería A. Buena mano de obra, mortero y diseño; reforzado, sobre todo lateralmente y unidas entre sí mediante el uso de acero, hormigón, etc. diseñado para resistir las fuerzas laterales.

Mampostería B. Buena mano de obra y mortero reforzado, pero no está diseñado en detalle para resistir fuerzas laterales.

Mampostería C. Mano de obra y mortero ordinario, sin debilidades extremas como dejar de atar en las esquinas, pero tampoco reforzadas ni diseñadas contra fuerzas horizontales.





Mampostería D. Materiales débiles, como el adobe, mortero pobre, bajos niveles de destreza; horizontalmente débil.

De acuerdo con la anterior clasificación se puede observar que, es a partir de la Mampostería B, donde se comienzan a presentar problemas, puesto que esta categoría es asignada a las edificaciones que, aunque cuentan con buena mano de obra, no están diseñadas para resistir fuerzas laterales, lo cual es de suma importancia en el ámbito de la vulnerabilidad sísmica.

A partir de lo anterior, se decidió poner como base las zonas con riesgo sísmico alto en la Ciudad de Tijuana, sobre esta base se sobrepuso la distribución de estas categorías. Recordemos que en capítulos anteriores se evaluó la vulnerabilidad estructural, sin embargo, este proceso permite observar y analizar el resto de estructuras, que en determinado momento fueron discriminadas debido a que no poseían las características requeridas para el tipo de análisis en cuestión.

Como resultado de este proceso, se obtuvo un mapa (Figura 5.4), el cual muestra que, en primer lugar, en la mayoría de la zona de estudio, predominan las estructuras construidas bajo el régimen de la categoría D, teniendo así, de manera inmediata, un panorama no muy alentador, puesto que ya se sabe que se trata de una zona activa desde el punto de vista sísmico, aun cuando en este estudio ya se han identificado las zonas específicas de riesgo. Se puede observar que la categoría C, abarca un 30 % de la ciudad, mientras que el 20 % restante está ocupado por construcciones enmarcadas en la categoría B, que aunque es la mejor para este caso, ya se ha comentado que las estructuras de ésta categoría carecen de resistencia a las fuerzas laterales, mismas que podrían ser generadas por el paso de ondas sísmicas.



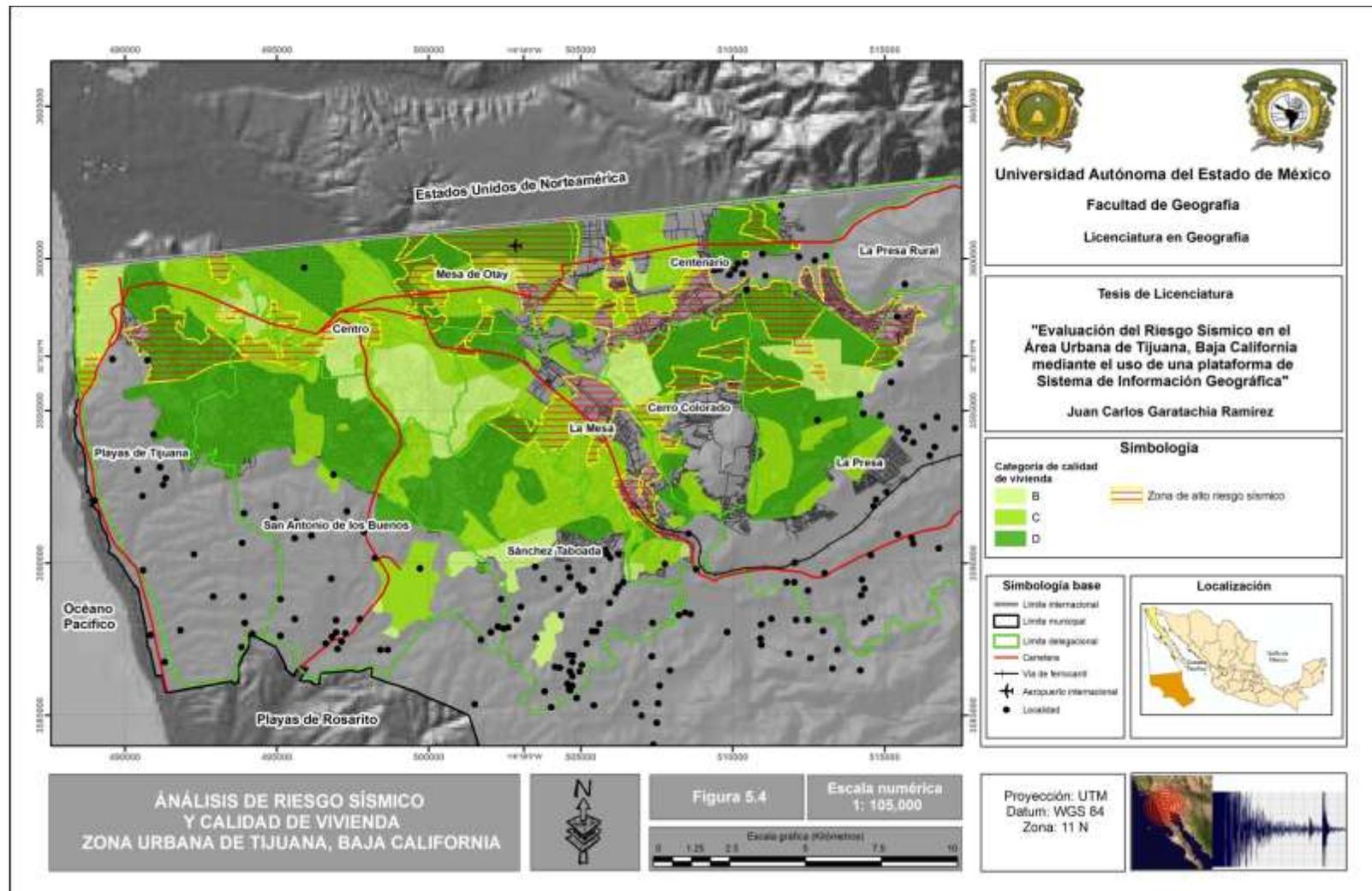


Figura 5.4 Análisis de riesgo sísmico mediante la distribución de la calidad de las estructuras y los niveles de riesgo altos.



"Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Urbana de Tijuana, Baja California mediante el uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica"



Si se ordenara a las delegaciones de manera descendente, por la relación que existe entre la distribución de categorías de construcción y la presencia de zonas con riesgo sísmico alto, quedaría de la siguiente manera, en primer lugar la Delegación Mesa de Otay, nótese que aunque es poca extensión territorial, está dominada por altos niveles de riesgo y predomina la categoría C y D; en segundo lugar aparece La Presa, en su porción urbana, seguida de Playas de Tijuana, la cual precede a la Delegación Centenario, las delegaciones La Mesa y Cerro Colorado podrían verse empatadas, mientras que San Antonio de los Buenos y Centro presentan un situación similar a las dos anteriores pero en menor cantidad.

Aunado a lo anterior, es necesario mencionar que, tal como se observa en el mapa, existe lo que se puede denominar como vacíos o huecos de información, lo más probable es que dicha situación puede deberse a que, para el año de creación de la información de este tipo, esas zonas de la Ciudad de Tijuana, estaban aun sin poblar o urbanizar; este supuesto queda descartado para la parte este de la Delegación La Mesa, puesto que es el cauce y la amplia planicie formada por el paso del Río Tijuana, la cual, aun en la actualidad, en esa parte sur, no está poblada de forma densa; también se descarta el supuesto para el caso de la Delegación Cerro Colorado en su parte Sur, lugar en cual se localiza el cerro que lleva el mismo nombre.

Este mismo producto cartográfico da pauta para pensar que en determinado momento, la distribución de las categorías de la calidad de las estructuras, puede ser ponderada y utilizada como una capa más de información, complementaria a la evaluación de vulnerabilidad estructural ya realizada, sin embargo, en el aspecto técnico, debido a los vacíos de información no sería correcto, ya que dichos vacíos se generarían también en los productos resultantes.





5.6 Riesgo sísmico en la Zona Urbana de Tijuana y ubicación de líneas vitales (*life lines*)

El manejo de los riesgos debe ser abordado desde una perspectiva integral, es decir, los elementos no deben ser aislados o independizados, en especial en escenarios de riesgo sísmico, en los cuales la cantidad y variedad de elementos expuestos aumenta dada la naturaleza, génesis y dinámica del proceso sísmico; Kyriazis y Kalliopi (2011), abordan este tema cuando plantean que un análisis de riesgo sísmico convencional se limita a la evaluación de los efectos directos, en función del peligro sísmico y la vulnerabilidad. Sin embargo, los mismos autores plantean que un estudio de riesgo sísmico avanzado contempla las líneas vitales, servicios públicos e infraestructuras, considerando a estos como elementos del sistema urbano, por lo cual deben considerarse las relaciones funcionales en el escenario de riesgo sísmico.

En esta investigación, una vez identificadas de forma espacial las zonas con distintos niveles de riesgo sísmico, se planteó la necesidad de conocer la situación de los servicios públicos de vital importancia en el contexto del escenario resultante. De tal manera que se consideraron tres elementos del sistema urbano que, de acuerdo a su utilidad y funcionalidad, ausencia por daños o presencia en zonas inadecuadas, puede potenciar el riesgo ante un escenario de desastre; y no solo ante un escenario propuesto en un tiempo presente, sino que estos elementos deben ser considerados en los planteamientos pre-desastre, dado el rol que desempeñan en el sistema urbano.

Los elementos que se tomaron en cuenta para este análisis son: la ubicación de estaciones de bomberos, puesto que este elemento debe estar ubicado en zonas de bajo riesgo, ya que durante un evento sísmico precursor de un desastre, debe ser funcional y estar activo con la finalidad de mitigar la concepción de procesos que se puedan desencadenar, como lo son los incendios o contribución en labores de rescate. El segundo elemento está representado por la ubicación de albergues, dichos entes serán de vital importancia ante un escenario de desastre, por lo cual deberán ubicarse, al igual que el primer elemento, en zonas de bajo riesgo y fácil acceso. Por lo que los resultados que arroje el presente análisis serán preponderantes para la formulación de medidas de mitigación. El tercer elemento





considerado en el análisis se refiere a la ubicación de estaciones de gasolina, dicho elemento es de aquellos que en este apartado se han considerado como posibles potenciadores del riesgo, por lo cual, su ubicación dará pauta a la identificación de zonas de riesgo alto pero con un alto potencial de aumento respecto a los procesos que se pueden desencadenar.

Cabe mencionar que los elementos considerados en este análisis no son los únicos que se pueden utilizar, sin embargo, se debe recordar que en esta investigación existe un apartado dedicado al análisis general de exposición, en el cual se incluye la concentración de escuelas por cada AGEB que conforma la Zona Urbana de Tijuana; así mismo se pueden incorporar otros elementos de los que conforman el sistema urbano.

Se decidió sobreponer la ubicación de los elementos descritos en los párrafos anteriores sobre el modelo de riesgo sísmico, obteniendo así un nuevo producto cartográfico (figura 5.5), del cual, al hacer una primera revisión, se puede observar que la mayoría de estos elementos/servicios, se ubican preferentemente en la parte centro-norte y un poco al noroeste, encontrando algunos de estos elementos en el resto de la Ciudad de Tijuana pero de manera dispersa.



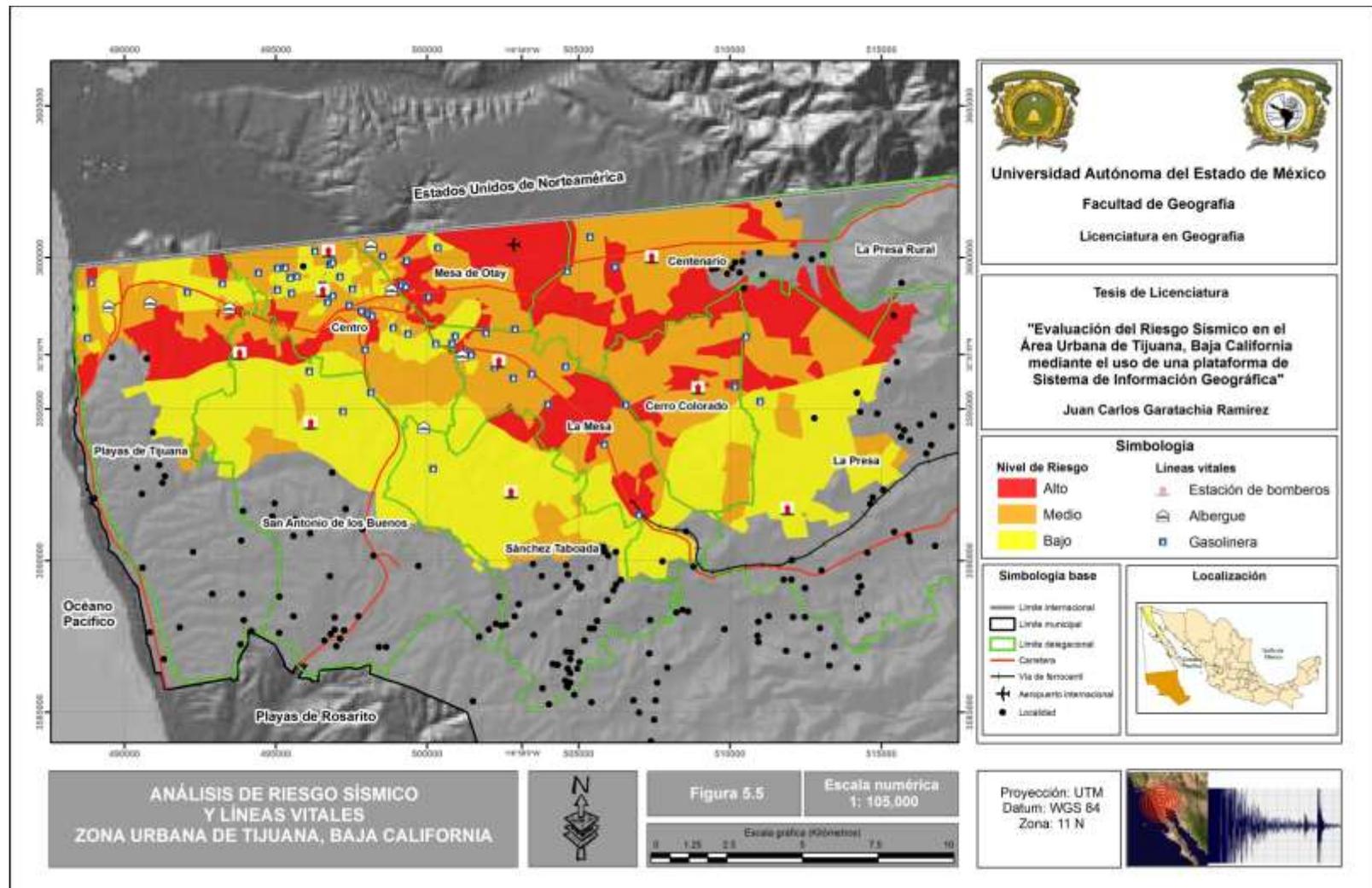


Figura 5.5 Mapa de análisis de riesgo sísmico y ubicación de albergues, estaciones de bomberos y gasolineras.



“Evaluación del Riesgo Sísmico en el Área Urbana de Tijuana, Baja California mediante el uso de una plataforma de Sistema de Información Geográfica”



En el análisis por delegaciones se observan los siguientes resultados. La Delegación Playas de Tijuana, presenta la ubicación de tres albergues, todos ellos en su parte Norte, el primero se encuentra al oeste, situado sobre una zona de riesgo sísmico bajo, el segundo se observa en la parte central, se sitúa sobre una zona de riesgo medio, pero muy cercano a donde se ubica una amplia zona de riesgo sísmico alto, el tercer albergue al oeste de la delegación se ubica justo sobre la zona de alto riesgo. En el caso de las gasolineras, se observan cuatro, la primera de ellas se sitúa sobre una zona de riesgo alto, justo en la esquina noroeste de la ciudad, que su vez es limítrofe con los Estados Unidos de Norteamérica. La siguiente gasolinera, se ubica en la parte sur de la zona urbana de esta delegación, situada en la planicie costera considerada aquí como de riesgo bajo, pero rodeada por dos zonas de riesgo medio. Las otras dos gasolineras se ubican al noreste, una de ellas en una zona neta de riesgo bajo y la otra también pero cerca de una zona de alto riesgo. En esta delegación no se ubican estaciones de bomberos.

La siguiente gráfica muestra los valores de cada delegación respecto a la ubicación de estructuras críticas, las delegaciones se encuentran ordenadas en orden descendente de acuerdo con el porcentaje de territorio con alto riesgo sísmico alto.



Figura 5.6 Número de estructuras críticas por delegación. Fuente: en base al mapa de líneas vitales.





En el caso de la Delegación San Antonio de los Buenos, no se ubican albergues; los elementos expuestos en su territorio se refieren a dos estaciones de bomberos, una de ellas al norte, en una zona de transición entre riesgo alto y bajo, mientras que la otra se ubica en la parte centro-sur de su zona urbana en un emplazamiento de riesgo bajo pero cerca de uno de riesgo medio. Para el caso de las gasolineras, las tres que se observan se localizan al este, dos de ellas en zona de riesgo bajo y la tercera justo en la frontera con la Delegación Centro y donde comienza una zona de riesgo medio.

La Delegación Centro es la que posee más elementos del sistema urbano expuestos, sin embargo con poca diversificación, puesto que veintitrés de éstos son gasolineras, mientras que solo se observan dos estaciones de bomberos y un albergue. En lo que respecta a la ubicación de las gasolineras en relación de las zonas de riesgo, solo tres de ellas, en la parte central, se sitúan en un emplazamiento de alto riesgo, mientras que las demás se ubican y concentran en la parte norte en zonas de riesgo medio y bajo, no obstante a los anterior, se debe recordar, como se ya se ha mencionado en otros capítulos, es en esta delegación en la que se concentra el mayor número de personas en la vida cotidiana de la ciudad, dadas las actividades productivas y laborales que ahí se dan, sin duda, la presencia de este tipo de elementos del sistema urbano potencia de manera considerable el riesgo sísmico en esta delegación. Las estaciones de bomberos se localizan en la parte centro-norte sobre zonas de riesgo medio, mientras que el albergue se observa al este en el límite de la delegación justo a un costado de una zona de riesgo alto con dos gasolineras, lo que sin duda genera una nueva zona de riesgo potencial.

La Delegación Mesa de Otay también presenta situaciones que pueden potenciar el riesgo, dado que, como ya se había dejado en entredicho en el párrafo anterior, se observan al oeste cuatro gasolineras situadas sobre una amplia zona de riesgo que se extiende de norte a sur, a la vez de que al oeste de dicha zona, cerca del límite internacional se observan un albergue y una gasolinera, el emplazamiento ahí es de riesgo medio. Sólo en el centro-norte de la delegación se vuelve a observar otra gasolinera en un emplazamiento de riesgo bajo. No obstante de que ya no se observan más elementos del sistema urbano en el resto de la





delegación, cabe mencionar una situación importante, la zona de riesgo alto que se observa al noreste es justo sobre la que se sitúa el Aeropuerto Internacional de Tijuana.

Otra de las delegaciones con probabilidad de potenciar la situación de riesgo, está representada por la Delegación La Mesa, misma que posee en su territorio en términos numéricos catorce gasolineras, un albergue y una estación de bomberos. El caso del albergue resulta de suma importancia puesto que, ubicado al noroeste, se sitúa en una zona de riesgo alto y a su vez está rodeado por cuatro gasolineras. La estación de bomberos se ubica sobre un emplazamiento de riesgo medio y cercano a una estación de gasolina. La parte central de la delegación se ve afectada por el dominio de una zona de riesgo medio sobre la cual se ubican cuatro gasolineras más, mientras que en la parte sur ocurre algo similar pero con solo una gasolinera.

En la parte centro-sur de la ciudad, se ubican una de las delegaciones quizá más seguras en cuanto a riesgo sísmico. Se trata de la Delegación Sánchez Taboada, la cual, se encuentra urbanizada solo en su fracción norte, misma que muestra dominancia de una amplia zona de riesgo bajo, sobre la cual se sitúa un albergue, una gasolinera y una estación de bomberos. Al noreste de la delegación se puede observar una zona de riesgo alto, sin embargo no muestra elementos de este tipo expuestos.

A medida que se recorre la ciudad hacia el este, es evidente la disminución de elementos expuestos, no así el caso de las zonas de riesgo sísmico alto. Resalta el caso de la Delegación Centenario, en la cual se ubican tres gasolineras, dos de ellas en zonas de riesgo alto y una en zona de riesgo medio al igual que una estación de bomberos. La Delegación Cerro Colorado presenta una situación similar a la anterior, al observarse una estación de bomberos en un emplazamiento de alto riesgo y dos gasolineras en la misma situación, ambas ubicadas al este en el límite con la Delegación La Presa, de la cual se puede resaltar la ubicación de una gasolinera en la parte centro-oeste en una zona de bajo riesgo pero cerca de un emplazamiento de alto; se observa también una estación de bomberos al sur de la delegación situada sobre una zona de valor bajo.





De manera general, en un orden descendente, se ha identificado a la Delegación Centro, seguida de La Mesa y Mesa de Otay, como las tres primeras en mayor nivel de riesgo y con probabilidad de potenciarse, dada la localización de estructuras críticas en su territorio.

La siguiente matriz muestra a manera de resumen los resultados de los factores de riesgo que dan a pauta a la creación de zonas con valores altos dentro de las delegaciones que conforman el área de estudio. Al mismo tiempo que permite realizar un análisis integral para cada delegación.





Delegación	Superficie de territorio con alto riesgo		Población aproximada en zonas de alto riesgo	Porcentaje por tipo de viviendas en zonas de alto riesgo		Número de estructuras críticas
	Superficie (ha)	Porcentaje (%)		B (%)	C (%)	
Mesa de Otay	927.7 ha	52.8 %	38,704 habitantes	B= 2.3 %	92.9 % del territorio con alto riesgo posee viviendas	Albergues: 1
				C= 29.5 %		Bomberos: 0
				D=36.9 %		Gasolinera: 7
Centenario	1160.4 ha	37.7 %	55,625 habitantes	B= 5 %	38.9 % del territorio con alto riesgo posee viviendas.	Albergues: 0
				C= 58 %		Bomberos: 1
				D=36.9 %		Gasolinera: 3
Playas de Tijuana	628.3 ha	26.5 %	38,455 habitantes	B= 9.7 %	93.3 % del territorio con alto riesgo posee viviendas.	Albergues: 3
				C= 16.4 %		Bomberos: 0
				D= 73.7 %		Gasolinera: 4
La Mesa	672.8 ha	24.1 %	27,751 habitantes	B= 17.7 %	56.5 % del territorio con alto riesgo posee viviendas	Albergues: 1
				C= 74.4 %		Bomberos: 1
				D= 7.7 %		Gasolinera: 13
Cerro Colorado	388.7 ha	16.9 %	37,517 habitantes	B= 4 %	73.3 % del territorio con alto riesgo posee viviendas	Albergues: 0
				C= 22.7 %		Bomberos: 2
				D= 73.1 %		Gasolinera: 3





Delegación	Superficie de territorio con alto riesgo	Población aproximada en zonas de alto riesgo	Porcentaje por tipo de viviendas en zonas de alto riesgo		Número de estructuras críticas
Centro	182.5 ha	18,148 habitantes	B= 11.3 %	100 % del territorio con alto riesgo posee viviendas	Albergues: 1
	7.4%		C= 88 %		Bomberos: 2
			D= 0.6 %		Gasolineras: 23
San Antonio de los Buenos	141.7 ha	18,419 habitantes	B= 1.58 %	100 % del territorio con alto riesgo posee viviendas	Albergues: 0
	5.9 %		C= 85.4 %		Bomberos: 2
			D= 12.9 %		Gasolineras: 3
Sánchez Taboada	112 ha	17,608 habitantes	B= 0 %	100 % del territorio con alto riesgo posee viviendas	Albergues: 1
	4.5 %		C= 26.4 %		Bomberos: 1
			D= 73.5 %		Gasolineras: 1

Tabla 5.1 Matriz de integración de variables para el análisis del riesgo sísmico





5.7 Propuesta de medidas de mitigación del riesgo sísmico

La idea de plantear medidas de mitigación, trae como consecuencia el adentramiento hacia otras fases del estudio de los riesgos, tal como lo plantean Ayala-Carcedo y Olcina (2002), quienes mencionan que, sí el riesgo es aceptable, no es necesario proceder a su reducción; si no es aceptable, hay que proceder a su reducción, entrándose en la fase siguiente, el análisis para la reducción de riesgos. A raíz de pláticas tanto con el Director de Protección Civil Municipal, así como en entrevista con el Presidente municipal de Tijuana, se sabe que el riesgo sísmico en la ciudad no es aceptable, puesto que tienen conocimiento de la potencial ocurrencia de un sismo de gran magnitud, del mismo modo asumen el conocimiento de que a diario en la zona se presentan microsismos, incluso algunos de magnitud media, por lo cual no descartan la ocurrencia de uno mayor; lo anterior da pauta a la necesidad de proceder a la reducción del riesgo

Hablar de medidas de mitigación para efectos causados por el riesgo sísmico, en lugares como la Ciudad de Tijuana, con altas concentraciones de población y viviendas resulta un tanto complicado, puesto que, la propia dinámica de crecimiento demográfico, misma que se ha dado desde hace muchos años, no permite ver con claridad la factibilidad de dichas medidas.

Es importante recordar que las medidas de mitigación de riesgos se clasifican en medidas estructurales y no estructurales. En el caso de procesos naturales como los terremotos, los cuales pueden ocurrir de manera súbita y rápida, se considera que las medidas de mitigación deben ser de tipo estructurales y dirigidas a la reducción de la vulnerabilidad, puesto que resulta más complicado reducir la exposición; lo anterior, ya lo prevén Del Moral y Pita (2002) cuando señalan que, en un escenario en el que hay que tomar las decisiones en situaciones de incertidumbre, lo que se impone es el principio de la precaución, es decir, la necesidad de perseguir la máxima seguridad aun cuando sigamos desenvolviéndonos en el terreno de la duda. De acuerdo a lo planteado por lo anteriores autores, se asume que, en el caso de esta investigación, importante transitar por el campo de la precaución, asumiendo así, que la propuesta de medidas estructurales resultará de utilidad. Por consiguiente se proponen las siguientes:





1. Realizar a fondo estudios e investigaciones que tengan como objetivo el conocimiento y análisis de la respuesta sísmica del terreno y que pretendan llegar a niveles de detalle tales como el cálculo de la máxima aceleración del terreno (PGA por sus siglas en inglés). El conocimiento de dicho parámetro deberá ser extendido lo máximo posible en toda la Zona Urbana de Tijuana y sus vecindades. Esta medida dará pauta a la siguiente:
2. Análisis y estudio para la formulación y aplicación de normas de construcción sismorresistentes que sean acordes a las características de la respuesta sísmica del terreno, mismas que se deberá buscar implementar en los instrumentos legales pertinentes, permitiendo así:
3. Elaborar estudios de evaluación de riesgo sísmico en estructuras civiles e infraestructuras públicas que se consideren de suma importancia para el funcionamiento del sistema urbano, permitiéndose esto llegar a la identificación de aquellas estructuras que no cumplan con las normas y realizar las adecuaciones pertinentes de índole ingenieril.

Se considera que las anteriores medidas tendrán una estrecha relación y darán pauta a la formulación de medidas de mitigación no estructurales, puesto que éstas tendrán como objetivo reducir la exposición en la medida de lo posible en escenarios futuros, tal como lo plantean Ayala-Carcedo y Olcina (2002) al mencionar que la idea del riesgo no es nueva; la vida en la actualidad no es ni más peligrosa ni más arriesgada que la de las generaciones precedentes, pero el balance de los riesgos y los peligros ha cambiado. Sin duda, la explicación de los autores versa en el sentido del contexto de una sociedad moderna, en la cual las condiciones de desigualdad y marginalidad merman el desarrollo óptimo del sistema urbano en este caso, por lo cual es necesario considerar planteamientos como los siguientes:

1. Dado que los niveles de exposición en la Zona Urbana de Tijuana son altos en la mayoría del territorio, este tipo de estudios, como el que aquí se presenta deben ser considerados cuando se elaboran los ordenamientos territoriales, mismos que se ven reflejados en los planes de desarrollo municipal. Con lo anterior, se coadyuvará a la





reducción de la exposición y vulnerabilidad socioeconómica, con lo cual se evitará la construcción de nuevas zonas de riesgo, mediante la delimitación de las nuevas zonas de crecimiento urbano; dichos ordenamientos deberán ser en cierto modo internacionales, dada la condición de ciudad fronteriza que presenta Tijuana. Es importante mencionar que esta medida va dirigida a escenarios futuros, por lo cual:

2. Se deberá analizar y gestionar la propuesta de la creación de planes de seguro que sean factibles para las zonas con alto riesgo sísmico. Dicha propuesta deberá incluir entre otras cosas, el análisis costo-beneficio que permita a los entes sociales con menores posibilidades económicas acceder a este tipo de instrumentos. Sin duda esta medida puede reducir el riesgo, al recordar que éste es una variable económica al final de cuentas. Esta medida deberá ir acompañada de aspectos tales como:
3. Un proceso de educación y culturalización de la población en el ámbito de los riesgos naturales y en específico para el caso de los riesgos geodinámicos internos, los cuales son los más recurrentes en esta zona de estudio; si bien la población goza de cierto conocimiento sobre este tipo de procesos, será necesario apuntalar aspectos que permitan la realización de las medidas 1 y 2, lo cual se podría lograr con la ayuda de:
4. Mayor difusión de la basta investigación científica que se genera a nivel regional en torno a este tipo de temáticas. No se propone realizar más cantidad, puesto que los centros de investigación en la región gozan de gran prestigio en lo referente al tema, sin embargo, como ya se ha mencionado, el ámbito fronterizo permite la interconexión institucional, lo cual deberá ser explotado en mayor medida con el país vecino del norte.





Conclusiones y recomendaciones

Antes de concluir es pertinente recapitular lo realizado en esta investigación, la cual, si se remonta a los aspectos fundamentales, se recordará que en su planteamiento del problema se habla sobre la necesidad de realizar estudios de riesgo sísmico integrales, de tal manera que se plantea que los sistemas de información geográfica son una herramienta de suma importancia para lograr la consecución de dichos estudios; para el caso de esta investigación, esa integralidad planteada en un primer momento se ve reflejada desde que, en el primer capítulo, se realiza una caracterización geológica de la zona de estudio, dejando a ésta como la base principal del proyecto, además, fue en esta misma etapa en la cual se abordó también el aspecto geológico, ambos aspectos contribuyeron de forma significativa en los resultados de la evaluación de la peligrosidad sísmica y de la vulnerabilidad estructural, logrando tener una relación estrecha.

En una siguiente etapa de la investigación, se comenzó a tratar el tema de la sociedad, viéndose esto reflejado en la evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica, sin duda este apartado fue crucial para alcanzar el principio de integralidad que se planteó al inicio; seguido de la relación realizada entre los entes estructurales y la respuesta sísmica del terreno se sumó un punto más al principio de integralidad, teniendo por una parte un elemento del medio físico y por otra un elemento del sistema urbano. Lo anterior dio pauta al encuentro de métodos y resultados que en un principio no habían sido concebidos como propios de la investigación, no obstante, lo anterior permitió obtener mejores resultados de los esperados. En este mismo contexto, un factor crucial que ya ha sido abordado en el párrafo anterior, fue el uso de la información geotécnica, puesto que ésta sentó la base tanto de la vulnerabilidad estructural, así como la de la peligrosidad sísmica en determinado momento, como ya se ha venido explicando en apartados anteriores.

El clímax de la investigación se presentó cuando, una vez listas todas las variables antes mencionadas, fueron vistas desde la perspectiva de la herramienta SIG, transformándose en capas de información con un significado y peso específico, lo cual permitió su integración para dar paso al análisis del riesgo sísmico, en conjunto con la integración de otros elementos del sistema urbano fue posible identificar de manera espacial las zonas con





mayores problemas en este ámbito en la Ciudad de Tijuana, permitiendo así dar cabida a la formulación de medidas de mitigación del riesgo, tanto estructurales como no estructurales. Con lo anterior se cierra la evaluación del riesgo, que en términos generales, para esta investigación fue la suma de la peligrosidad sísmica más la vulnerabilidad socioeconómica más la vulnerabilidad estructural y la exposición.

La primera conclusión se da en función al cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de la investigación, los cuales, si bien tuvieron que ser modificados por diversos factores, nunca perdieron el enfoque primordial de llegar al estudio de riesgo, por consiguiente se considera que han sido alcanzados de manera satisfactoria, y las limitaciones en cada uno de ellos ya han sido explicadas en los apartados correspondientes.

Respecto al primer objetivo, si se realiza un desglose de los componentes, la conclusión que de aquí emana es que, en el caso de la caracterización geológica, fue desarrollada y llevada a buenos términos, en especial el aspecto de los lineamientos geológicos fuente de peligro, sin embargo se recomienda realizar o encontrar estudios más detallados sobre la geología superficial, así como incluir lo referente a una porción del Sur de California en los Estados Unidos de Norteamérica, con la finalidad de no truncar los resultados de la investigación que, aunque está delimitada a la Zona Urbana de Tijuana, se debe recordar que este tipo de procesos naturales no respetan límites territoriales. En lo que respecta a la caracterización geotécnica, el objetivo fue cubierto, sin embargo, los estudios están centralizados a la Zona Río de Tijuana, mientras que en otras zonas solo se encuentran de dos a tres máximos, se recomienda buscar nuevas fuentes de información, así mismo, en caso de continuar abordando esta investigación, se recomienda la implementación de nuevo trabajo de campo de esta índole.

En el siguiente objetivo se planteó la evaluación de la vulnerabilidad, tanto socioeconómica como estructural. La primera, para efectos de conclusiones, se considera válido mencionar que se obtuvieron resultados buenos, pero no tanto como se esperaban, dado que, en principio, se pretendía evaluarla a nivel de manzana urbana, sin embargo, la gran extensión territorial de la zona de estudio dificultó esta tarea, llegando al nivel de detalle de AGEB únicamente. En este sentido, se recomienda evaluar la vulnerabilidad socioeconómica a





nivel de manzana urbana, dado que, ya existe la información referente a población y vivienda a ese nivel de detalle, no obstante, en ese mismo contexto de la información, se recomienda también el uso de una metodología más actual que utilice variables que han aparecido en los recientes censos de población y que inclusive sea más *ad hoc* al territorio en cuestión. En el caso de la vulnerabilidad estructural, se considera que fue evaluada con resultados positivos en lo que a su desarrollo respecta, puesto que se logró el nivel de detalle deseado, así mismo, esta variable dependió en gran medida del uso del sistema de información geográfica, permitiendo así la aplicación y adquisición de nuevas habilidades en esta área. Aun con los buenos resultados, cabe mencionar que se recomienda implementar al menos tres puntos más de mediciones de ruido ambiental con la finalidad de calcular el período de vibración del suelo, puesto que en la zona norte y sur de la Delegación Playas de Tijuana, se carece de puntos de control, lo que resulta en información no confiable para el suroeste de la zona de estudio. Así mismo es importante mencionar que, la vulnerabilidad estructural, es quizá uno de los temas en el ámbito del riesgo sísmico que deben ser abordado con mayor nivel de detalle e incluso, la temática es lo suficiente amplia para ser abordada en una investigación específica, dada la cantidad de variables que involucra así como la gran variedad de métodos que existen para evaluarla. No obstante, en esta investigación se logró encontrar la forma de ser evaluada y analizada, contribuyendo así estudio integral de riesgo.

El último objetivo, referido al uso de la plataforma de sistema de información geográfica en su momento de mayor peso, fue cumplido de forma satisfactoria. Incluso permitió la obtención de dos mapas finales de riesgo sísmico, de los cuales uno de ellos fue elegido para el posterior análisis de riesgo, como ya se explicado con anterioridad. En este momento de la investigación fue posible, mediante el uso del SIG, realizar la sobreposición de nuevas capas de información, lo que permitió analizar a nivel de cada delegación el contexto en el que se encuentran en cuanto al proceso sísmico. En ese tenor, se recomienda implementar el análisis de más elementos del sistema urbano, tales como el caso de puentes, estaciones de policía y edificios gubernamentales, ya que no se abordan en la presenta investigación. Así mismo se recomienda que, en caso de continuar con esta investigación, se considere el estudio de procesos secundarios que se pueden desencadenar





en caso de la ocurrencia de un sismo, como es el caso de movimientos de remoción en masa por inestabilidad de laderas.

Para finalizar, se concluye que, se ha cumplido el objetivo general, así como los objetivos específicos. Así mismo se ha dado respuesta a las interrogantes o inquietudes plasmadas en el planteamiento del problema. Se sugiere que uno de los aspectos fundamentales que se podrían evaluar con el uso de esta investigación está referido al análisis económico de daños causado por riesgo sísmico.





Referencias

Ayala-Carcedo, F.J. & Olcina, C. J. (2002) *Riesgos Naturales*. Barcelona: Ariel Ciencia. Ayuntamiento de Tijuana. Dirección de Protección Civil (2009) *Informe Final de Microzonación Sísmica de Tijuana 2009*. [Online] Disponible en <http://www.tijuana.gob.mx/dependencias/proteccioncivil/planes.asp>. Consultado el 10 de septiembre de 2012

Association of Bay Area Governments (2011). *Earthquake and Hazards Program. Modified Mercalli Intensity Scale (MMI)*. Disponible en: http://webshaker.ucsd.edu/homework/2009_Modified_Mercalli_Intensity_Scale.pdf Consultado: 24 de febrero de 2013.

Bazán E. y Meli R. (2002) *Diseño sísmico de edificios*. Ed. Limusa

Berger, V. y Schug, L (1991). *Probabilistic evaluation of seismic hazard in the San Diego-Tijuana Metropolitan region*. Environmental perils in the San Diego region, P.L. Abbot y J.W. Elliot (eds). Geological Society of America Annual Meeting.

Beles, A., Ifrim, D. y García, A., (1975). *Elementos de ingeniería sísmica*. Barcelona: Ediciones Omega.

Calvo, G. T., F. (1984). *La Geografía de los Riesgos*. Cuadernos Críticos de Geografía Humana. [En línea] 9 (54). Disponible en: <http://www.ub.edu/geocrit/geo54.htm>. Consultado: 16 de marzo de 2013.

CENAPRED, Centro Nacional Para la Prevención de Desastres (2012) *Sismología y Riesgo Sísmico*, México: Autor, Disponible en: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Investigacion/RGeologicos/Sismologia/#opcion2>. Consultado el 10 de septiembre de 2012.

Colegio de la Frontera Norte, Sistema de Información Geográfica y Estadística de la Frontera Norte, Institute de Recherche pour le Développement (2001). *Aportes para un escenario sísmico en Tijuana: ¿y si un terremoto de magnitud 6.5 se produjera en la falla de la nación?* [Online] Tijuana, Baja California. Disponible en <http://proceedings.esri.com/library/userconf/latinproc00/mexico/aportes.pdf> [Acceso: 06/03/2012].

Chile. Naciones Unidas, Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (2001). *La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina*. Santiago de Chile: Naciones Unidas. [En línea] Disponible en:





<http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/6553/lcl1490e.pdf>. Consultado el 15 de marzo de 2013.

Cruz, M. (2002) *Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México*. GEOS. Unión Geofísica Mexicana, A.C. (4). P. 37-42.

Day, W., R. (2002). *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. USA: Mc Graw Hill.

Espinosa, M. del P. (2000) *Impacto urbano del Riesgo Sísmico: Mapas de daños esperables en las construcciones*. Territorios, [Online] No. 003. Disponible en: www.redalyc.org. [Acceso: 08/01/2012].

Environmental Systems Research Institute, Inc ESRI (2011). *GIS Dictionary*. [En Línea]. Disponible en: <http://support.esri.com/en/knowledgebase/Gisdictionary/browse>. Consultado el 16 de marzo de 2013.

Gobierno del Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente (2013) *Fundamentos para la Gestión Ambiental*. En edición.

González de Vallejo L.I. et al. (2002) *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

H. XVI Ayuntamiento Constitucional de la ciudad de Tijuana, B.C. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (2001) *Proyecto RADIUS. Caso Tijuana*. [Online] Tijuana, Baja California. Disponible en: <http://www.tijuana.gob.mx/dependencias/proteccioncivil/pdf/proyectos/Reporte%20Final%20del%20Proyecto%20RADIUS.pdf> [Acceso: 03/03/2012].

Hernández Heredia, A.I. (2012) *Estudio de atenuación y respuesta sísmica del terreno en la región noreste de Sonora, México*. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California.

Huerta, C.I. Roesset y Stokoe, K.H. (1998) *Evaluation of the random decrement method for in situ soil properties estimation*. Proceedings of the Second International Symposium on The effects of Surface Geology on Seismic Motion. Recent progress and new horizon on ESG study. Vol. II, pp. 749-756. 12/1998.

Huerta López C., J. Pulliam y Nakamura (2003) *In-situ evaluation of shear waves velocities in seafloor sediments with a broadband ocean-bottom seismograph*. Bulletin of the Seismological Society of America. 93 (1) p. 139-151

Huerta, L. C. et al (2011) *Implementación de técnicas de campo y de algoritmos no convencionales de procesamiento para determinar in-situ las propiedades y la respuesta sísmica de los suelos e instrumentación acelerométrica en la Ciudad de Tijuana B.C., México*. No publicado.





Ibarra, G., Oliver, F. y Acosta, J. (2009) *Microzonación de períodos dominantes del suelo de la Ciudad de Tijuana, Baja California*. Epistemus. [Online] 7 (10) p. 13-17. Disponible en: http://www.unison.edu.mx/difusiondelacultura/revista_epistemus/epistemus_nov2009.pdf. Consultado el 27 de septiembre de 2012.

Iglesias, S., Irigaray, C. y Chacón, J., (2006). *Análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas mediante Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la Ciudad de Granada*. Cuadernos Geográficos [Online] Número 39. Universidad de Granada, España. Disponible en: Red de Revistas Científicas de América Latina y El Caribe, España y Portugal, <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=17103909> [Acceso: 02/2012].

Iturbe et al (2009). *Consideraciones conceptuales sobre los Sistemas de Información Geográfica*. [En línea] Tlaxcala, México: El Colegio de Tlaxcala A.C. Disponible en: http://books.google.com.mx/books?id=HwocFNysPcoC&printsec=frontcover&dq=Sistema+de+Informaci%C3%B3n+Geogr%C3%A1fica&hl=es&sa=X&ei=NRhGUeD_Da322QXFqICQDg&ved=0CEMQ6AEwBA. Consultado el 16 de marzo de 2013.

Instituto de Geofísica UNAM (2012) Servicio Sismológico Nacional: *Regiones Sísmicas de México*. [Online] Disponible en: http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/region_sismica_mx.jsp [Acceso: 14/04/2012]

Kyriasis, D. Pitilakis y Kalliopi G. Kakderi (2011). *Seismic Risk Assessment and Management of Lifelines, Utilities and Infrastructures. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Santiago, Chile. [Online] Disponible en: <http://www.vce.at/SYNER-G/pdf/publications/5ICEGE-Pitilakis%20%20theme%20lecture.pdf> Acceso: 24 de febrero de 2013.

Keller, A. E. & Blodgett, H. R. (2004) *Riesgos Naturales: Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Madrid: Pearson Educación.

Martínez, Rubiano, M. T, (2009). *Los geógrafos y la teoría de riesgos y desastres ambientales*. Perspectiva Geográfica: Revista del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía [En línea] 14(1) págs. 241-263. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3644793>, Consultado: 17 de marzo de 2013.

Maureira Carsalade, N. (s/f) *Dinámica de Sistemas Elásticos. Cátedras de Diseño Sísmico*. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de la Santísima Concepción. [Online] Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/55659653/24/Dinamica-de-Sistemas-Elasticos>. Consultado el 10 de septiembre de 2012.

McCalpin, James P. (s/f) *Earthquake Magnitude Scales*. Disponible en: http://www.elsevierdirect.com/companions/9780123735768/casestudies/01~Appendix_1.pdf. Consultado el 7 de septiembre de 2012.





Mena, H.U. (2002) *Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas*. Memoria de la tesis de Doctorado en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica: Universidad Politécnica de Cataluña.

México. Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres (2006) *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos: Evaluación de la Vulnerabilidad Física y Social*. México, D.F.

México. Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres (2006) *Fenómenos Geológicos*. México, D.F.

México. Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres (2001) *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*. México, D.F.

Minch, J.A. (1967) *Stratigraphy and Structure of the Tijuana-Rosarito Beach Area, Northwestern Baja California, Mexico*. Geological Society of America Bulletin. V. 78 p. 1155-1178.

Michigan Tech UP seis (2007 a) *How Are Earthquakes Measures, USA*: Autor, Disponible en: <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/intensity.html>. Consultado el 7 de septiembre de 2012.

Moreno Rodolfo A y Aguilar Zenón (2003) *Análisis del Riesgo Sísmico en la Ciudad de Moqueagua usando sistemas de información geográfica*. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil-Iquitos. Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Loreto del Colegio de Ingenieros del Perú.

Moreno, R.A. & Aguilar, Z. (2003) *Análisis de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Moqueagua usando Sistemas de Información Geográfica*. En XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos 2003.

Lewis, C. y Stock, J. (1998) *Late Miocene to Recent transtensional tectonics in the Sierra San Fermín, northeastern Baja California, Mexico*. Journal of Structural Geology. V. 20. 8. p. 1043-1063.

Reichle, M. (1991). *Eartquake planning scenario for the San Diego-Tijuana area*. Enviromental perils in the San Diego region, P.L. Abbot y J.W. Elliot (eds). Geological Society of America Annual Meeting

R. Clarke (2011). *Seismic Structural Vulnerability*. Global Earthquake Model Workshop Trinidad. [En línea] Disponible en: <http://uwiseismic.com/Downloads/STRUCTURAL%20VULNERABILITY%20-%20GEM%20Workshop%20-%20Clarke.pdf> Consultado el 15 de marzo de 2013.

Rodríguez, M. (2007) *Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos. Aplicación a la Ciudad de Barcelona*. Tesina. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica: Universidad Politécnica de Cataluña.





SMIS, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (s/f a) *Sismos*, México: Autor, disponible en: <http://www.smis.org.mx/> . Consultado el 7 de septiembre de 2012

SMIS, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (s/f b) *Tipos de ondas*, México: Autor, disponible en: <http://www.smis.org.mx/>. Consultado el 7 de septiembre de 2012

SMIS, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (s/f c) *Escalas sísmicas, intensidad y magnitud*, México: Autor, disponible en: <http://www.smis.org.mx/>. Consultado el 7 de septiembre de 2012.

U.S Department of Homeland Security, FEMA (2012). *HAZUS. FEMA's Methodology for Estimating Potential Losses from Disasters* [Online]. Last Modified: Thursday, 23-Feb-2012 22:00:19. Disponible en: <http://www.fema.gov/hazus>

Universidad de Costa Rica. Laboratorio de Ingeniería Sísmica (2009). *Educativo*, Costa Rica: Autor. Disponible en <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=Inicio> Consultado el 10 de septiembre de 2012.

USGS, United States Geological Survey (2012 a) *Love wave*, USA: Autor, disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=Love%20wave>. Consultado el 7 de septiembre de 2012.

USGS, United States Geological Survey (2012 b) *Rayleigh wave*, USA: Autor, Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=Rayleigh%20wave>. Consultado el 7 de septiembre de 2012.

USGS, United States Geological Survey (2012 c) *Earthquake Topics for Education: EQ101* USA: Autor, Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/> . Consultado el 10 de septiembre de 2012.

USGS, United States Geological Survey (2012 d) *Magnitude*, USA: Autor, Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?termID=118>. Consultado el 7 de septiembre de 2012.

USGS, United States Geological Survey (2012 e) *2008 National Seismic Hazard Maps-Faults Parameters*. USA: Autor, Disponible en: http://geohazards.usgs.gov/cfusion/hazfaults_search/disp_hf_info.cfm?cfault_id=127def. Consultado el 26 de septiembre de 2012.

Raines, L., Hatch, M. y Haley, C (1991). *Liquefaction potential in the San Diego-Tijuana metropolitan region*. Environmental perils in the San Diego region, P.L. Abbot y J.W. Elliot (eds). Geological Society of America Annual Meeting.





Rosquillas, A. et al (s/f) *Risk Mapping for Strategic Planning of Shelter Response in Tijuana, Baja California, Mexico*. Global Risk Identification Program [Online] Disponible en:<http://www.gripweb.org/gripweb/sites/default/files/Risk%20Mapping%20for%20Strategic%20Planning%20of%20Shelter%20Response%20in%20Tijuana,%20Baja%20California,%20Mexico.pdf>
. Consultado: 26 de septiembre de 2012.

Wai-Fah, C. y Scawthorn, C. (eds.). (2002). *Earthquake engineering handbook*. Volumen 24 de New directions in engineering civil. Florida: Taylor & Francis.





ANEXOS





ANEXO 1

Descripción de estudios geotécnicos realizados en la Zona Urbana de Tijuana

A continuación se presenta la descripción de los estudios geotécnicos para las zonas que han sido enunciadas con anterioridad.

Zona Río Tijuana

Clave del estudio	Profundidad total (metros)	Descripción de materiales	Espesor aproximado (mts)
001	5.90	Capa subrasante formada a base de arenas arcillosas, húmeda, muy firme.	1.0
		Arenas finas secas, con algunas gravas de mediana a alta compacidad. Depósitos aluviales recientes.	4.40
002	8.60	Arena de baja a mediana compacidad. Arenas de grano medio a fino. Arenas de río. Con aisladas gravas de hasta ¾" y algunos boleos pequeños.	1.80
		Capas estratificadas formadas por arenas con algo de arcilla y limos poco plásticos de bajas densidades. A los 4.0 m. apareció el nivel freático. Continúan arenas finas y limos saturados de bajas compacidades.	6.60
003	4.50	Relleno formado por arenas, arcillas y gravas. Contaminadas con escombros y basura. De deficientes propiedades mecánicas.	3.90
		Suelos friccionantes, constituidos por arenas finas limosas con algunas gravas y boleos de hasta 4" de diámetro de buenas propiedades mecánicas. Arenas de alta compacidad.	0.60
00A* (SMMS)	31.50	Capas intercaladas de arenas de grano fino a medio. Arenas bien graduadas con gravas y arenas limo-arcillosas de baja a mediana compacidad.	5.15
			2.60
		Estrato compuesto por gravas y boleos empacados fuertemente en arenas.	3.0
			1.0
		Estrato limo-arenoso de consistencia muy firme.	18.0
		Conglomerado formado por gravas y boleos de hasta 8" de diámetro envueltos en una matriz arenosa húmeda a saturada. Estrato de mediana compacidad.	5.50
		Arenas y gravas aisladas muy compactas.	2.0





004	15.0	Intercalación de arena gris de grano grueso.	1.0
		Arenas y limos con materia orgánica y abundante raíces.	0.50
		Intercalaciones de capas con abundante cantidad de gravas. Arenas limosas con gravas aisladas y algunos boleos. Arenas de grano medio a grueso.	6.0
005	3.40	Arenas limosas y arcillosas de grano fino a medio. Estrato de baja compacidad.	2.0
		Arenas de grano medio a grueso, de alta compacidad. Suelos de la terraza fluvial antigua de la margen izquierda del Río Tijuana.	1.35
006	6.0	Arenas arcillosas y arenas limosas con grava de hasta 3" de diámetro.	0.90
		Mezclas de arenas, gravas y boleos de hasta 5" de diámetro. Boleos bien empacados (conglomerado).	0.40
		Arcilla de baja plasticidad, de alta consistencia con algunas gravas incrustadas.	1.20
		Arenas de grano medio a fino con algunas gravas. Arenas de baja compacidad relativa.	0.60
		Arenas con gravas y algunos boleos. Arenas de mediana compacidad relativa, de grano grueso y de buena graduación.	2.90
007	5.30	Material de relleno formado por arenas arcillosas, residuos vegetales y algunos escombros, de baja a mediana compacidad. Se observan gravas y boleos en todo el espesor.	4.70
		Arenas gruesas compactas. Arenas de río con apreciable presencia de aceites.	0.60
00B	3.0	Arcilla de alta plasticidad de alta consistencia.	2.0
		Mezcla de gravas y boleos empacados fuertemente en arcillas arenosas.	1.0
00C	12.0	Arenas de grano fino.	2.0
		Arenas de grano medio a grueso intercaladas con gravas y boleos de alta compacidad.	10.0
008	3.80	Capa vegetal que envuelve a algunos boleos pequeños.	0.35
		Conglomerado compuesto por gravas y boleos hasta de 12" de diámetro envueltos en una matriz areno-arcillosa. Suelos de mediana o alta compacidad relativa pertenecientes a los depósitos clásticos continentales de la zona de lomeríos.	3.30
		Relleno compuesto por mezclas de arenas y arcillas de baja densidad.	1.0
		Capa arcillo-arenosa.	0.30





009	7.20	Depósitos aluviales antiguos, formados por mezclas de arenas, gravas y algunos boleos pequeños. Arenas pobremente graduadas. Arenas y limos. Suelos friccionantes de mediana a alta compacidad.	5.70
00D	16.0	Arenas arcillosas y/o arcillas arenosas con algunas gravas.	1.50
		Arenas de grano grueso con gravas y boleos de hasta 24” de diámetro.	11.25
		Arena limosa.	1.25
010	3.30	Relleno muy húmedo formado por mezclas heterogéneas de arenas, gravas, boleos y escombros. Relleno suelto.	2.10
		Arenas y gravas con pequeños boleos. Estrato de alta compacidad. Depósitos clásticos continentales.	0.60
		Suelos volcano-sedimentarios firmes correspondientes a la formación “Otay”.	0.60
011	4.72	Arcillas arenosas de baja consistencia.	0.65
		Arenas arcillosas de mediana compacidad.	1.20
		Continúan arenas arcillosas de mayor densidad. Se observan elevados contenidos de humedad	1.80
		Arenas finas (francas) de alta compacidad.	0.60
		Mezcla de arenas, gravas y boleos de alta compacidad.	0.32
012	19.50	Relleno areno-arcilloso compactado con gravas.	1.30
		Alternadas capas de mezclas de arenas y arcillas constituyendo arenas arcillosas y arcillas arenosas, con gravas y aislados boleos de hasta 12” de diámetro incrustados. Suelos de mediana densidad.	16.81
		Arenas gruesas a medias. Arenas de río de mediana compacidad con gravas y boleos.	1.68
013	5.30	Arenas arcillosas de alta densidad.	1.10
		Arenas arcillosas y/o limosas medianamente densas.	1.20
		Limos arenosos muy compactos.	2.40
		Arcillas arenosas medianamente densas.	0.50
014	11.30	Relleno heterogéneo, arenas arcillosas claras. Estrato de baja compacidad.	0.50
		Arenas limosas (capa vegetal)	0.40
		Depósitos recientes formados por mezclas de arenas, limos y arcillas. Saturado por la presencia de escurrimientos, mezcla de arcilla y arena.	7.4
		Arcillas y/o arenas arcillosas, con algunos	0.60





		boleos de hasta 4" de diámetro. Muy húmedo.	
		Arenas finas y limos con algunos boleos pequeños. Estrato de alta compacidad.	0.80
		Al profundizar se incrementa notablemente el porcentaje de gravas y boleos.	0.20
015	15.00	Arcillas de alta plasticidad de baja consistencia.	1.0
		Suelos areno-arcillosos de baja densidad.	1.60
		Estrato areno limoso de baja densidad.	3.85
		Suelos compuestos por arenas arcillosas de alta compacidad.	3.00
016	6.20	Relleno suelto formado por arenas arcillosas con gravas y algunos boleos. Existen materiales artificiales superficialmente.	0.50
		Mezclas de arcillas muy plásticas húmedas y arenas arcillosas de grano medio a fino. La consistencia de los suelos plásticos es baja hasta cerca de los 3.0 metros, a partir de ahí se incrementa la resistencia del suelo hasta encontrar arenas arcillosas cerca de los 5.0 metros de profundidad.	5.30
017	6.35	Rellenos formados por mezclas de arenas, arcillas y gravas superficialmente compactos, formando parte de la estructura del pavimento y losas, como capa sub-rasante.	1.30
		Arenas arcillosas de mediana compacidad con algunas gravas ocasionales.	2.10
		Arcillas de alta plasticidad, de alta consistencia con incrustaciones de carbonatos de calcio.	1.00
		Arenas arcillosas de alta compacidad con aisladas gravas. En el fondo del sondeo se notó un escurrimiento ligero.	2.00
018	8.80	Relleno formado por mezclas de arenas con algunos escombros.	0.40
		Suelos plásticos, arenas arcillosas y arcillas arenosas de baja plasticidad de medianas consistencias.	1.70
		Suelos formados por mezclas de arenas, gravas y abundantes boleos de 4" a 18" de diámetro. Suelos de la terraza de la margen izquierda del río Tijuana (depósitos antiguos). Estos suelos de mediana compacidad se apreciaron en toda la profundidad explorada, se estima que se extienden varios metros más.	6.70
		Suelos formados por sucesiones de arcillas arenosas y/o arenas arcillosas de baja consistencia. Existen algunas gravas y pequeños boleos incrustados.	2.80





019	5.50	Arcillas arenosas de alta consistencia y de baja plasticidad.	2.20
		Mezcla de arenas, gravas y boleos. Suelos friccionantes de alta compacidad. Estos suelos son característicos de la margen izquierda del río Tijuana.	0.30
020	4.10	Capa intemperizada.	0.30
		Suelos de la terraza fluvial de la margen izquierda del río Tijuana constituidos por arenas arcillosas de mediana a alta compacidad en los primeros metros. En ocasiones aparecen lentes de arcilla de alta consistencia.	3.80
021	3.00	Arcillas de baja plasticidad y alta consistencia.	1.25
		Arenas arcillosas de transición entre arcillas y arenas muy compactas.	0.20
		Gravas y boleos hasta de 18" de diámetro envueltas en matriz arenosa. Suelos de medianas a altas compacidades.	1.45
022	5.30	Relleno compuestos por mezclas de suelos con escombros y basura, tales como: trozos de plásticos, papeles, ladrillos, alambres, vidrios, etc, con arcillas, algunas gravas y escasos boleos pequeños incrustados.	3.70
		Suelos cohesivos-friccionantes de alta compacidad y/o consistencia con incrustaciones de algunas gravas. Suelos del terreno natural.	1.60
023	2.60	Capa intemperizada formada por arcillas arenosas con raicillas y materia orgánica.	0.20
		Arcillas arenosas de alta consistencia.	0.60
		Arenas limosas de grano medio a fino. Arenas de baja a mediana compacidad. Aparecen gravas (la compacidad aumenta después de los 2.00 m observándose gravas y boleos pequeños).	1.80
024	4.25	Relleno heterogéneo formado por mezclas de arenas y arcillas con algunas gravas de baja densidad. Contaminado con escombros.	3.00
		Arenas limosas de grano medio con gravas de mediana a alta compacidad.	1.25

Tabla A.1 Descripción de los sondeos y estudios geotécnicos realizados en la Zona Río Tijuana.





Zona de Playas de Tijuana

Clave del estudio	Profundidad total (metros)	Descripción de materiales	Espesor aproximado (mts)
027 1 de 2	0.60	Arcillas arenosas secas, de alta consistencia, abundantes gravas, conteniendo materia orgánica (capa vegetal).	0.30
		Gravas arcillosas, con boleos hasta de 6" de diámetro, de alta compacidad con incrustaciones de carbonato de calcio.	0.30
027 2 de 2	1.47	Arcillas arenosas secas, de alta consistencia, abundantes gravas, conteniendo materia orgánica (capa vegetal).	0.30
		Gravas arcillosas, con boleos hasta de 6" de diámetro, de alta compacidad con incrustaciones de carbonato de calcio.	0.90
		Arenas arcillosas, con gravas y boleos de hasta 7" de diámetro, de alta compacidad	0.27

Tabla A.2 Descripción de los sondeos y estudios geotécnicos realizados en la zona de Playas de Tijuana.

Zona de Otay

Clave del estudio	Profundidad total (metros)	Descripción de materiales	Espesor aproximado (mts)
028 1 de 2	6.20	Arcillas de alta plasticidad de mediana consistencia.	0.60
		Suelos de la Formación Lindavista, caracterizados por arenas de grano medio a grueso, con algunas gravas y boleos hasta de 8" de diámetro, de mediana a alta densidad.	5.60
028 2 de 2	8.30	Capa vegetal seca, con algunas gravas y boleos pequeños.	0.80
		Arcillas arenosas de alta plasticidad y alta consistencia con gravas y boleos pequeños. Arenas arcillosas con abundantes gravas y boleos hasta de 12" de diámetro, de alta densidad; pertenecientes a la Formación Lindavista.	7.50
029 1 de 2	6.55	Arenas gruesas con gravas y boleos de hasta 8" de diámetro.	2.40
		Relleno de arcillas de alta consistencia con gravas y boleos hasta de 18" de diámetro.	1.90
		Arcilla de alta plasticidad y alta consistencia, con gravas y boleos.	1.90





		Conglomerado natural formado por mezclas de arenas, gravas y boleos grandes alta compacidad.	0.30
029 2 de 2	6.10	Arenas gruesas con gravas y boleos de hasta 18" de diámetro.	2.40
		Relleno de arcillas de alta consistencia con gravas y boleos hasta de 8" de diámetro.	1.20
		Arcilla de alta plasticidad y alta consistencia, con gravas y boleos.	4.90

Tabla A.3 Descripción de sondeos y estudios geotécnicos realizados en la zona de Otay.

ANEXO 2

Evaluación de la capacidad de respuesta de la Unidad Municipal de Protección Civil.

De acuerdo a la metodología planteada por CENAPRED, misma que fue utilizada para la evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica, el objetivo de este apartado es evaluar de forma general el grado en el que se encuentra capacitado el encargado de la protección civil en el municipio para incorporar conductas preventivas y ejecutar tareas para la atención de la emergencia. En este mismo contexto, dicha evaluación resulta complementaria a la vulnerabilidad socioeconómica, puesto que, una mayor capacidad de prevención y respuesta significa menor vulnerabilidad y viceversa.

En lo que respecta a la realización de esta evaluación, se utilizó un cuestionario que consta de veinticuatro preguntas, mismas que van enfocadas al conocimiento de los recursos, y programas con los que cuenta la Unidad de Protección Civil Municipal de Tijuana, dichos cuestionamientos están ponderados, teniendo un valor de 0 para la respuesta "SI" dado que este respuesta representa mayor capacidad de respuesta y de 1.0 para la respuesta "NO" , con lo cual al final se pueden obtener valores entre 0 y 22, puesto que las dos últimas preguntas son abiertas y no tienen una ponderación. En función de que el cuestionario debe ir dirigido al titular de la dependencia en cuestión, éste fue aplicado al C. Antonio Rosquillas Meneses, Director de la Unidad de Protección Civil del Municipio de Tijuana, en fecha del 18 de julio de 2012 en la Ciudad de Tijuana, Baja California.





En un primer planteamiento, el resultado de esta evaluación propone que la instancia de protección de civil de Tijuana cuenta con una muy buena capacidad de respuesta, puesto que el puntaje obtenido ha sido de 2, recordando que las respuestas “NO” tienen valor de 1.

En los siguientes planteamientos se describen los aspectos e indicadores basados en el cuestionario con los que cuenta la Ciudad de Tijuana y que le permiten tener una muy buena capacidad de respuesta. Así mismo se incluyen comentarios adicionales realizados por el Director de la Unidad de Protección Civil.

- El Municipio de Tijuana cuenta con unidad de protección civil que maneja la prevención, mitigación, preparación y respuesta.
- La Unidad de Protección Civil cuenta con un plan de emergencia.
- Cuenta con un consejo municipal integrado por autoridades municipales y sociedad civil para que en caso de emergencia organice y dirija las acciones. En el caso de la Ciudad de Tijuana, se cuenta también con un Comité Científico-Ciudadano, en cual existen cuatro mesas de diversas temáticas acordes a la prevención de desastres.
- La Unidad de Protección Civil de Tijuana está regulada en sus funciones por un reglamento interior y un reglamento municipal.
- Tiene conocimiento de programas de apoyo para la prevención, atención y mitigación de desastres.
- Cuenta con mecanismos de alerta temprana. El director de la unidad hizo mención los mecanismos de alerta para riesgos hidrometeorológicos, como el caso del Sistema San Diego RADAR y el uso de sus pluviómetros, así como el uso del Sistema de CENAPRED.
- Cuenta con canales de comunicación. Destacan el radio VHF, el radio MAFRA y el teléfono satelital.





Figura A.1 El C. Antonio Rosquillas Meneses muestra el equipamiento con el que cuenta la Unidad de Protección Civil Municipal en materia de telecomunicaciones.

- De acuerdo a la unidad de protección civil, las instituciones de salud municipales cuentan con programas de atención a la población en caso de desastres.
- La Unidad de Protección Civil Municipal tiene establecidos los sitios que pueden fungir como helipuertos.
- Tiene establecidos los sitios que pueden funcionar como refugios temporales. Así como también existe el vínculo con centros de asistencia social para lo operación de los albergues y distribución de alimentos.
- La Unidad de Protección Civil Municipal promueve la realización de simulacros en las distintas instituciones así como también la formulación de planes familiares de protección civil.
- En la dependencia cuentan con 14 trabajadores activos, mismos que a decir del director forman parte del Sistema Municipal de Protección Civil. Dicho personal está capacitado para informar sobre qué hacer en caso de una emergencia.





- En lo que respecta al uso de tecnología geoespacial, la Unidad de Protección Civil Municipal de Tijuana, cuenta con un Sistema de Información Geográfica, el cual contiene mapas con la identificación de zonas críticas o de peligro, así mismo cuenta con un sistema de posicionamiento global, que de acuerdo al director está disponible en una versión convencional y una de precisión.



Figura A.2 Plan Municipal de Contingencias para el municipio de Tijuana, B.C. y Sistema de Información Geográfica de la Unidad de Protección Civil Municipal.

Como ya se mencionó al inicio de este apartado, la capacidad de respuesta de la Unidad de Protección Civil es muy buena, lo cual se ha corroborado con los anteriores planteamientos. Mismos que son resultado de haber respondido “SI” en el cuestionario respecto a la posesión de dichas herramientas y conocimientos.

En el caso de las respuestas que fueron respondidas con un “NO” por parte del director de la unidad de protección civil, se desprenden los siguientes planteamientos, resalta el primero, puesto que resulta un tanto contradictorio con el hecho de haber respondido que sí al cuestionarle sobre la existencia de planes de emergencia:

- La Unidad de Protección Civil Municipal no tiene establecidas las posibles rutas de evacuación y acceso en caso de emergencia y/o desastre.
- La Unidad de Protección Civil Municipal no cuenta con un stock de alimentos, cobertores. Colchonetas y pacas de lámina de cartón para casos de emergencia.





La preguntas abiertas del cuestionario están dirigidas en primera instancia, al grado promedio de escolaridad del personal activo de la Unidad de Protección Civil Municipal de Tijuana, mismo que está referido al nivel de educación media superior en promedio. En segundo lugar, cuando se le preguntó al director qué actividades realiza la unidad normalmente, él respondió que se llevan a cabo principalmente actividades de capacitación a la población y dan atención a las solicitudes de evaluación de riesgos.

