

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**"Análisis de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Moquegua  
Usando Sistemas de Información Geográfica"**

TESIS

Para optar el Título Profesional de  
INGENIERO CIVIL

RODOLFO ANIBAL MORENO LLACZA

Lima - Perú  
2002

## RESUMEN

Los efectos de los desastres naturales son múltiples y complejos, van mucho más allá de las lamentables pérdidas de vidas humanas y damnificados. En los países en vías de desarrollo, como Perú, tienen grandes implicaciones en el Producto Bruto Interno e inclusive en el número de desplazados. La reducción de los Riesgos Naturales debe ser un compromiso no sólo de las instituciones dedicadas a la investigación sino de las administraciones Locales, Regionales y Nacionales.

Un sistema de información geográfica (SIG) provee un entorno ideal para hacer un comprensivo análisis de peligro y riesgo sísmico. Un SIG tiene la capacidad de almacenar, manipular, analizar, y visualizar una gran cantidad de información de datos tabulares y espaciales requeridos. El sistema puede ser enlazado a programas externos, a bases de datos, y sistemas expertos basados en el conocimiento. Debido a todas estas capacidades que nos brinda esta herramienta, la presente investigación intenta mostrar la utilidad del SIG en la ingeniería civil, específicamente en la gestión del riesgo sísmico.

El objetivo de esta tesis es aplicar la metodología propuesta en el ATC36, el cual permite analizar el peligro y el riesgo sísmico de una región a través del uso de Sistemas de Información Geográfica, siendo la ciudad de Moquegua la región analizada.

La tesis describe en detalle la actual tecnología SIG y los diferentes pasos para realizar un análisis de peligro y riesgo sísmico regional. El peligro sísmico se ha analizado con el programa RISK para sismos escenarios con 50 y 100 años de exposición. Sin embargo para alcanzar los valores de la aceleración pico a nivel de superficie se ha analizado el sismo del 23/06/2001 como un sismo escenario adicional. El comportamiento dinámico del suelo es evaluado en base a mediciones de microtrepidaciones y a la caracterización geotécnica de la zona en estudio. Una vez determinada la amenaza sísmica a nivel de superficie para los tres sismos escenarios, los daños y las pérdidas son estimados superponiendo los mapas de amenaza con el inventario de las edificaciones. La clasificación estructural del inventario fue elaborada adoptando las curvas de vulnerabilidad de la ciudad de Antofagasta (Norte de Chile). Tener como sismo escenario al sismo del 23/06/2001 nos ha permitido comparar, los resultados de los estimados con los observados en campo. Además de las conclusiones y recomendaciones se plantea una serie futuras investigaciones que deberían ser elaboradas con el fin de cubrir el gran vacío existente en el tema de vulnerabilidad y riesgo sísmico de una región.

# INDICE

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Generalidades .....	2
1.2.1. Ubicación Geográfica .....	2
1.2.2. Accesibilidad.....	2
1.2.3. Clima .....	3
1.2.4. Hidrografía .....	4
1.2.5. Formaciones Ecológicas .....	5
1.2.6. Población y Aspectos Socio-económicos .....	6
1.2.7. Atractivos y Recursos Turísticos .....	6
1.3. Objetivo y Alcance del Estudio.....	7
1.4. Organización del Estudio .....	7
1.4.1. Recopilación de Información .....	8
1.4.2. Verificación de la Información en Campo .....	8
1.4.3. Inventario de las Edificaciones y Escenarios Sísmicos .	8
1.5. Contenido del Estudio .....	8
<b>2. Sistemas de Información Geográfica .....</b>	<b>12</b>
2.1. Generalidades .....	12
2.1.1. Definición .....	12
2.1.2. Historia y Evolución .....	12
2.1.3. Importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) .....	13
2.1.4. Relación entre Cartografía Asistida por Computadora (CAC) y el SIG .....	14
2.1.5. Componentes Básicos de un SIG .....	14
2.1.5.1. Soporte Físico – Hardware .....	14
2.1.5.2. Soporte Lógico – Software .....	15
2.2. Base de Datos Espaciales .....	17
2.2.1. Conceptos Iniciales .....	17
2.2.2. Estructuras Relacionales.....	19
2.2.3. Base de Datos Orientadas a Objetos .....	20
2.2.4. Diseño de Base de Datos .....	21
2.2.5. Bloques y Capas de Información (Tiles-Layers).....	23
2.2.5.1. Criterios Para la configuración de Bloques.....	24
2.2.5.2. Criterios Para la Selección de Capas / Niveles .	24
2.2.6. Carga y Generación de la Base de Datos .....	25
2.2.7. Bases Cartográficas Digitalizadas .....	26

2.2.8. Formatos de Datos Para Intercambio de Datos Cartográficos Digitalizados .....	27
2.3. Análisis y Modelamiento de Datos .....	27
2.3.1. Análisis de Datos.....	28
2.3.1.1.Operaciones Principales de Análisis de Datos Geográficos .....	29
2.4. Modelamiento Cartográfico .....	31
<b>3. Análisis de Fenómenos Geodinámicos de la Ciudad de Moquegua</b>	<b>33</b>
3.1. Introducción .....	33
3.2. Peligro Sísmico .....	34
3.2.1. Sismicidad Histórica .....	34
3.2.2. Sismotectónica de la Región Sur Occidental del Perú ..	40
3.2.3. Metodología y Resultados del Análisis del Peligro Sísmico .....	43
3.2.3.1.Metodología Adoptada .....	43
3.2.3.2.Fuentes Sísmogénicas .....	45
3.2.3.3.Leyes de Atenuación.....	45
3.2.3.4.Aceleraciones Máximas Esperadas .....	47
3.3. Características Físicas de la Ciudad de Moquegua .....	50
3.3.1. Topografía .....	51
3.3.2. Geomorfología.....	51
3.3.3. Geología Estructural.....	52
3.3.4. Geodinámica .....	52
3.3.5. Hidrogeología .....	53
3.3.6. Comportamiento Dinámico del Terreno .....	53
3.3.7. Zonificación Geotécnica .....	55
3.3.8. Amplificación Sísmica .....	58
3.4. Integración de los Fenómenos Geodinámicos Dentro del Entorno SIG.....	63
<b>4. Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de la Ciudad de Moquegua .....</b>	<b>67</b>
4.1. Introducción .....	67
4.2. Metodología.....	71
4.2.1. Ventajas .....	71
4.2.2. Limitaciones.....	72
4.2.3. Equipo y Software Utilizado .....	73
4.3. Aspectos Socio-Económicos de la Ciudad de Moquegua.....	75
4.3.1. Población .....	76
4.3.2. Características de las Viviendas .....	78
4.3.3. Evolución y Proceso de la Consolidación Urbana .....	81

4.3.4. Infraestructura Vial .....	82
4.3.5. Principales Actividades Económicas de la Región .....	83
4.3.5.1. Proyecto Especial Pasto Grande .....	84
4.3.5.2. Actividad Minera .....	85
4.4. Análisis de la Vulnerabilidad Física.....	86
4.4.1. Definiciones de Daño .....	88
4.4.2. Relaciones de Movimiento-Daño .....	89
4.4.3. Estudios Previos de Vulnerabilidad en la Ciudad de Moquegua .....	91
4.4.4. Análisis de los Daños Registrados Durante el Terremoto del 23/06/2001 .....	92
4.5. Inventario de Edificaciones .....	98
4.5.1. Información Requerida Para el Inventario .....	98
4.5.2. Fuente de Datos Para el Inventario y Esquemas de Clasificación .....	99
4.5.3. Inventario de las Edificaciones de la Ciudad de Moquegua .....	101
4.6. Estimación de Daños Para Sismos Escenarios.....	104
4.6.1. Estimación de Daños en la Ciudad de Moquegua dentro del Entorno SIG .....	105
4.7. Evaluación del Riesgo Sísmico.....	112
4.7.1. Estimación de Pérdidas Económicas.....	113
4.7.2. Estimación del Número de Víctimas .....	115
4.7.3. Riesgo Sísmico de la Ciudad de Moquegua dentro del Entorno SIG .....	116
<b>5. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>121</b>
5.1. Conclusiones.....	121
5.2. Recomendaciones .....	124
5.3. Trabajos Futuros .....	125
BIBLIOGRAFÍA.....	128
ANEXO A: RELACIONES DE MOVIMIENTO – DAÑO .....	131
ANEXO B: CURVAS DE VULNERABILIDAD REVISADAS ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE MOQUEGUA .....	134
ANEXO C: DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE EDIFICACIONES SEGÚN ESTUDIOS PREVIOS DE VULNERABILIDAD EN LA CIUDAD DE MOQUEGUA.....	137
ANEXO D: COMPARACIÓN DE ESCALAS DE INTENSIDADES Y DESCRIPCIÓN DE NIVELES DE DAÑOS SEGÚN LA ESCALA MSK .....	140
ANEXO E: LOTES DE LA CIUDAD DE MOQUEGUA, SEGÚN CENTRO POBLADO DENTRO DEL ENTORNO SIG.....	142
ANEXO F: TABLAS EMITIDAS POR CONATA .....	144
FOTOS .....	147
PLANOS .....	152

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Las amenazas son permanentes, ya sea de tipo sísmico, volcánico o por inundaciones, un ejemplo de ello es la ciudad de Moquegua, la cual a lo largo de su historia se ha visto afectada por varios sismos, siendo el de Junio del 2001 el último gran sismo que soportó.

Un país como Perú no debería darse el lujo de perder vidas, bienes e infraestructura como puentes, carreteras, oleoductos, refinerías, si cuenta con profesionales de primer nivel que pueden contribuir a la importante labor social de reducir al mínimo los efectos de los fenómenos naturales, éstos sí, incontrolables.

El futuro de Perú es responsabilidad de todos, debemos pensar a largo plazo y contribuir al bienestar de los ciudadanos, debemos proteger nuestro patrimonio histórico, nuestros edificios más representativos, así como también la fuente de nuestra riqueza. Tenemos que ampliar la perspectiva y darnos cuenta de que con inversiones mínimas protegemos el trabajo y la vida de nuestros conciudadanos y de nosotros mismos.

Es importante conocer cuál es la incidencia de un desastre natural en el producto interno de un país, cuántos desplazados generan las inundaciones y cuántos los sismos. El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), indica que el sismo del 23 de Junio del 2001 ocasionó en el departamento de Moquegua la muerte de 22 personas, 277 heridos y 57467 damnificados, además de 4062 viviendas afectadas y 2738 destruidas.

Debemos reducir la vulnerabilidad de nuestras ciudades a los desastres naturales, es lo que llaman algunos sociólogos "adaptabilidad al riesgo", aspecto que han desarrollado con mucho éxito algunas ciudades en zonas con alta amenaza, como puede ser Tokio. Para ello se debe conocer adecuadamente los niveles de amenaza a los que estamos expuestos, en segundo lugar ver la vulnerabilidad de nuestros sistemas y tomar la decisión de reducirla a niveles razonables, admisibles y acordes con nuestra realidad socioeconómica.

En la presente investigación se realiza una evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Moquegua, tratando de rescatar la información

recopilada en la evaluación de daños realizada después del terremoto del 23 de Junio del 2001. Esta información permitirá evaluar los niveles de riesgo sísmico al que estuvo expuesta dicha ciudad y entender mejor el nivel de pérdidas materiales y de vidas humanas generado por este desastre.

## **1.2 Generalidades**

### **1.2.1 Ubicación Geográfica**

La ciudad de Moquegua se ubica alrededor de la coordenada 70°55'54" de longitud Oeste y 17°11'23" de latitud Sur, con una altitud promedio de 1410 m.s.n.m. Esta ciudad es la capital del distrito de Moquegua, de la Provincia Mariscal Nieto, del Departamento de Moquegua. El distrito de Moquegua tiene una superficie de 3949.04 Km<sup>2</sup> y la zona de estudio tiene una superficie de 33.17 Km<sup>2</sup> de los cuales la superficie urbana representa el 30%. La Figura 1-1 muestra la ubicación geográfica de la ciudad de Moquegua y la división política del departamento de Moquegua.

La zona urbana de Samegua no está contemplada en el presente estudio, debido al alcance del convenio suscrito con CONCYTEC, pues esta no pertenece al distrito de Moquegua. La Figura 1-2 muestra la división política de la provincia Mariscal Nieto en la cual se puede observar que la ciudad de Moquegua está limitando con el distrito de Samegua por el Noreste.

Delimitan al valle de Moquegua en su extremo Norte los cerros Huaracane, Estuquiña y los Angeles. En el lado Este se ubican los cerros Baúl, Mirador, Lagunillas y Cuesta de Bronce. Por el lado Sur el valle se encajona abruptamente en los materiales del volcánico Toquepala, dando comienzo así al río Osmore el que finaliza en el valle de Ilo. En el extremo Oeste se levantan los cerros Trapiche, Pan de Azúcar y Santa Ana.

### **1.2.2 Accesibilidad**

El acceso vía terrestre es por intermedio de un desvío de 5 km. a la altura del Km 1145 de la carretera Panamericana Sur, carretera que conecta esta ciudad con Tacna y Arequipa. También tiene acceso a través de la carretera Moquegua – Puno, la cual a su vez conecta esta ciudad con los distritos de Torata y Carumas de la

Provincia Mariscal Nieto. Por intermedio de un desvío de esta carretera, la ciudad de Moquegua tiene conexión con el distrito de Omate, de la provincia general Sánchez Cerro. La ciudad de Moquegua dista 95 km del puerto de Ilo a través de la vía Panamericana Sur.

Además, la ciudad de Moquegua cuenta con un aeropuerto que permite el acceso aéreo, pero en la actualidad no se realizan vuelos comerciales.

### 1.2.3 Clima

La ciudad de Moquegua tiene un clima cálido y desértico, con días soleados durante todo el año. La temperatura media anual es de 19.5 grados centígrados, variando desde una máxima promedio anual de 25.6 grados entre los meses de Enero a Marzo y una mínima promedio anual de 11 grados centígrados en los meses de Mayo y Junio. La máxima velocidad del viento registrada es de 4 nudos, presentándose generalmente en el mes de Agosto. La dirección predominante del viento es Sur - Sureste.

De acuerdo al análisis de la información meteorológica de la estación de SENAMHI ubicada en el lugar de estudio, se establece que el clima se caracteriza por su luminosidad, con un promedio de 8.7 horas de sol por día y una humedad relativa promedio de 57%.

#### ***Características Climáticas***

Precipitación líquida media anual	15.15 mm.
Humedad relativa promedio anual	57%
Temperatura máxima promedio anual	25.6° C
Temperatura mínima promedio anual	11.0° C
Temperatura media	19.5° C

Sin embargo, en el año de 1993 se registró una intensa precipitación que alcanzó los 100 mm en tres días de lluvias, ocasionando severos daños en las viviendas de adobe y de material rústico, inundando calles y avenidas con una altura de agua de hasta 25 cm.

La temperatura determina que este sector latitudinal sea propicio para el cultivo de frutales y forrajes.



#### 1.2.4 Hidrografía

La región desagua al Pacífico, siendo los ríos Moquegua y Locumba, de régimen temporal, los más importantes en esta región.

El río Moquegua tiene sus orígenes en los nevados de Chuquiananta y Arundane. Sus cursos son alimentados fundamentalmente por las precipitaciones que caen en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes y, en menor proporción, provenientes de los deshielos de los nevados. En sus nacientes toma el nombre de río Asana, y durante su recorrido adopta el nombre de Coscori y Tumulaca y a la altura de la ciudad de Moquegua, toma el nombre de río Moquegua, posteriormente en la localidad de Ilo hasta su desembocadura en el mar toma el nombre de Osmore. Los principales afluentes del río Moquegua son Torata, Huaracane y la quebrada de Guaneros en la margen derecha y el río Capillune en la margen izquierda.

La cuenca del río Moquegua tiene una área de 3480 Km<sup>2</sup>, con una longitud de 139 Km, la pendiente promedio es de 3.6%. El río Moquegua es de régimen irregular y de carácter torrentoso, con extremadas diferencias entre sus descargas. La descarga media anual de los ríos Tumulaca y Torata es de aproximadamente 1.56 m<sup>3</sup>/seg, y 1,32 m<sup>3</sup>/seg, respectivamente. Las máximas descargas se concentran básicamente entre Enero y Marzo, disminuyendo notoriamente entre los meses de Julio a Setiembre.

La salinidad que impera en las aguas es debido a su contenido de sulfato de calcio y de cloruro de sodio. El nivel de boro en sus aguas se encuentra dentro los límites permisibles. El PH fluctúa entre los 6.5 y 8.3, los valores más bajos corresponden a la parte alta y estos aumentan hacia el litoral. Con el Proyecto Pasto Grande, tanto Moquegua como Ilo han resultado muy beneficiados por la disponibilidad de las aguas provenientes de la presa del mismo nombre.

El río Tumulaca es el tributario principal, inicialmente toma el nombre de río Asana. Después de un corto recorrido con dirección Suroeste, sigue al Oeste hasta alcanzar el paraje de Tumulaca; en este sector, el río discurre en una quebrada bastante profunda y de laderas empinadas. La corriente es torrentosa y el volumen de agua normalmente es muy pequeño con relación a la profundidad

del valle. En el tramo citado recibe por su margen derecha varios riachuelos que provienen de los nevados Arundane y por el lado izquierdo las aguas temporales del río Capillune. Este tiene su origen en el flanco Sur del volcán Chuquiamanta y después de un corto recorrido, con dirección Sur, dobla al Oeste-Noreste, cruzando casi diagonalmente al cuadrángulo por su parte central, hasta alcanzar el río Asana, a unos kilómetros aguas arriba del villorio de Tumulaca.

El río Torata y sus tributarios riegan la parte Noroccidental, las nacientes de estos ríos quedan en la vertiente alta de los Andes, todos son torrentosos y sus caudales varían notablemente a través del año; en época de lluvias el caudal es abundante y durante el estiaje disminuye notablemente hasta secarse completamente en muchos casos.

El valle de Torata en su mayor parte es profundo y de laderas bastante empinadas a casi verticales, sólo en el tramo que queda aguas arriba y aguas abajo del pueblo de Torata los flancos del valle se encuentran tendidos y los terrenos son aprovechados en agricultura.

Por otro lado en la Evaluación de Peligros de la Ciudad de Moquegua realizada por UNSA-INDECI se indica que existen excelentes acuíferos en el valle de Moquegua. Los principales lo constituyen la formación Toquepala y Moquegua, cuya potencia alcanza los 100 metros.

### **1.2.5 Formaciones Ecológicas**

El relieve es plano y ligeramente ondulado en algunos sectores y en otros de topografía abrupta, teniendo laderas de fuerte pendiente propio de una zona de gran erosión en el pasado. Suelos propios del desierto del tipo yermosoles (cálcicos a gípsicos) en algunos sectores con contenidos salinos, a excepción del valle que son fluviosoles y arenosos.

La vegetación en la zona de estudio es escasa, encontrándose mayormente sólo en el cauce del río. La actividad agrícola y ganadera ha logrado incrementarse desde la puesta en funcionamiento de la Presa de Pasto Grande.

### **1.2.6 Población y Aspectos Socio-Económicos**

Se estima que la población del distrito de Moquegua para el presente año es de 45136 habitantes (INEI, 2002) con una densidad poblacional de 11.4 hab./Km<sup>2</sup>.

La información que se presenta a continuación está basada en el último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI en el año 1993.

La población urbana del distrito de Moquegua representa el 93.5%, con una tasa de crecimiento intercensal 1981-1993 igual al 3.30%.

La población femenina representa el 49% de la población total y el porcentaje de la población de 15 y más años con primaria completa a más es igual al 79.30%.

El número de viviendas particulares para el año 1993 era de 9103, de los cuales 5716 disponen de abastecimiento de agua, 6117 tienen alumbrado eléctrico y 5262 tienen servicio de desagüe. El porcentaje de hogares sin agua, desagüe, ni alumbrado es 6.30% y el porcentaje de hogares con al menos un artefacto electrodoméstico es 87.40%.

La Población Económicamente Activa (PEA) de 6 y más años es 12136 de donde 8209 son hombres y 3927 son mujeres.

El porcentaje de la PEA ocupada de 15 y más años en agricultura representa 13.50%, en servicios 68.20%. Esto nos muestra que ésta es una ciudad poco poblada, cuya actividad económica principal es la de servicios y la agricultura.

### **1.2.7 Atractivos y Recursos Turísticos**

La Ciudad tiene tres principales fiestas tradicionales, los cuales son:

Aniversario de Moquegua, cuyo día central es el 24 de Noviembre y es celebrado en la misma ciudad.

Santa Fortunata, es celebrado el día 14 de Octubre en la misma ciudad.

Fiestas de las cruces, cuyo día central es el 03 de Abril y también es celebrado en la ciudad de Moquegua.

Entre los principales centros turísticos de la zona están:

Cementerio de Santa. Fortunata

Las Bodegas  
Museo Contisuyo

Hasta 1994 la ciudad contaba con 5 hoteles, 10 hostales y 18 restaurantes, para poder recibir a sus visitantes.

### **1.3 Objetivo y Alcance del Estudio**

El sismo del 23 de Junio del 2001 dejó daños significativos en toda la ciudad de Moquegua. Tanto pérdidas humanas como económicas fueron registradas debido principalmente a que esta ciudad en su conjunto no estaba preparada para este tipo de eventos, pues además de la amenaza sísmica, muchas familias viven en viviendas que son altamente vulnerables.

El principal objetivo de esta disertación es aplicar la metodología propuesta en el ATC-36 para analizar el peligro y riesgo sísmico usando sistemas de información geográfica en la ciudad de Moquegua, por lo que nos permitirá evaluar la vulnerabilidad de las edificaciones y el riesgo sísmico de la ciudad, fundamentado en la estimación del daño físico ó el escenario de pérdidas obtenidas a partir de los efectos físicos esperados en los elementos expuestos.

Dado que los resultados obtenidos del presente estudio son herramientas para la comunidad profesional involucrados en la toma de decisiones (ingenieros, arquitectos), dichos resultados deben ser tratados teniendo en cuenta que el inventario de edificaciones está en un 80% del total de las existentes en la ciudad.

El presente estudio intenta mostrar la utilidad de la tecnología SIG en uno de los campos de la ingeniería civil y poner de conocimiento que esta herramienta puede ser usada en otros trabajos diferentes al presentado en esta investigación.

### **1.4 Organización del Estudio**

La elaboración del presente trabajo de investigación ha demandado la realización de una serie de actividades, como son la recopilación de información, verificación de la información referente al tipo de edificaciones existentes en la ciudad, elaboración del inventario de edificaciones, generar los escenarios sísmicos en el entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la elaboración del informe, el cual ha sido realizado de acuerdo a la

metodología del ATC-36. Seguidamente se describen cada una de estas actividades realizadas.

#### **1.4.1 Recopilación de Información**

En esta etapa se ha recopilado toda información disponible relacionada con el presente estudio, tales como: plano topográfico con curva de nivel a cada 25 m, estudios geológicos, estudios geotécnicos, información de la sismicidad del área de interés, estudios de investigación con fines de microzonificación, estudios de vulnerabilidad sísmica, base gráfica georeferenciada, base de datos del catastro de la ciudad de Moquegua. Ha sido de gran ayuda obtener toda esta información en formato digital, pues de otro modo se habría necesitado más tiempo y recursos económicos para digitalizar dicha información.

#### **1.4.2 Verificación de la Información en Campo**

La verificación en campo de la información catastral se ha desarrollado muestreando edificaciones elegidas aleatoriamente en las diferentes zonas de la ciudad. Así, los centros poblados verificados fueron: El Cercado, El Siglo, San Francisco, Mariscal Nieto, San Antonio y Los Angeles.

#### **1.4.3 Inventario de Edificaciones y Escenarios Sísmicos**

El inventario de edificaciones es una labor que implica uniformizar la información obtenida de diferentes fuentes, eliminar datos redundantes, inferir datos que no están consignados, en base a otra información y a través de reglas de inferencia, y administrar toda la información (13766 lotes) de modo que pueda ser utilizada para el análisis del riesgo sísmico. Todo este trabajo es también llamado “desarrollo de una base de datos integra”.

Con la base gráfica y la base de datos se elaboró una base de datos espacial para las edificaciones existentes en la ciudad, para lo cual ha sido necesario juntar ambas bases dentro del entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y posteriormente generar los sismos escenarios de acuerdo a las condiciones geotécnicas sísmicas.

### **1.5 Contenido del Estudio**

El presente informe final documenta todas las actividades realizadas para analizar la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de la ciudad de Moquegua. El

contenido del informe ha sido estructurado de tal forma que haya una secuencia entre los diferentes aspectos analizados. Así, en el Capítulo II se presenta una introducción a las tecnologías SIG, mostrando definiciones, capacidades de almacenamiento, de análisis y la evolución de esta tecnología.

El Capítulo III presenta la evaluación del peligro sísmico al que se encuentra expuesto la ciudad de Moquegua. Este análisis se ha realizado utilizando el método probabilístico propuesto por Cornell (1968). También se han analizado los efectos de sitio y finalmente la superposición de ambos efectos para generar los mapas de intensidades sísmicas para los tres sismos escenarios.

El Capítulo IV analiza la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de la ciudad de Moquegua usando Sistemas de Información Geográfica, generando mapas de daños y pérdidas, los cuales servirán como una herramienta para dar lineamientos de planificación y mitigación ante amenazas sísmicas. El Capítulo V contempla algunos de estos lineamientos como también las conclusiones y recomendaciones alcanzadas en esta investigación.

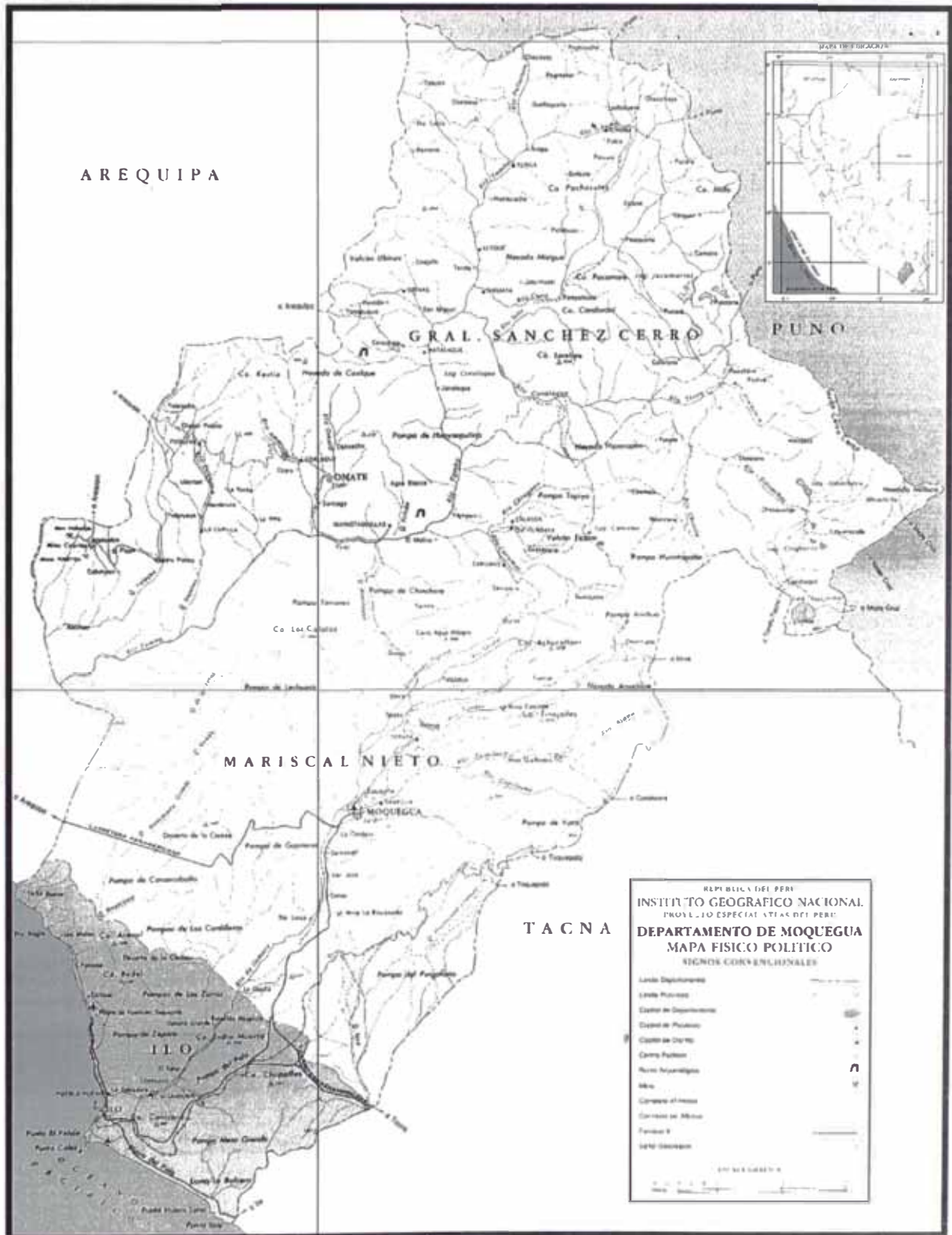


Figura 1-1: Ubicación Geográfica de la Ciudad de Moquegua.



**Figura 1-2:** División Política de la Provincia Mariscal Nieto



## CAPÍTULO 2

### SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

#### 2.1 Generalidades

##### 2.1.1 Definición

Formalmente, un Sistema de Información Geográfica (SIG) se define como un conjunto de instrumentos y métodos especialmente dispuestos para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar información territorial georreferenciada del mundo real.

El conjunto de instrumentos y procedimientos organizados permite proporcionar información útil para la toma de decisiones. Además de esta definición formal, un SIG puede ser definido en función de sus posibilidades de realizar operaciones espaciales y unir conjuntos de datos usando campos llaves comunes. También puede ser definida a través del conjunto de preguntas que es capaz de atender.

##### 2.1.2 Historia y Evolución

En 1964 el Departamento de Agricultura de Canadá creó lo que se viene considerando como el primer Sistema de Información Geográfica, orientado al inventario y planificación del territorio y de sus recursos naturales. En su creación se definieron y resolvieron muchos de estos conceptos que actualmente dan cuerpo y solidez a los SIG, especialmente los relacionados con la estructura y organización de las bases de datos y métodos de captura de información.

Poco tiempo después, en el Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis de la Universidad de Harvard, centro pionero en las tecnologías en cuestión, se elaboró uno de los primeros productos de cartografía automática, cuya evolución posterior, basada en la integración explícita de la topología de los objetos cartográficos en la estructura de información espacial dio lugar al nacimiento de un SIG de tipo vectorial, construido sobre la idea de una estructura de datos topológicos tipo «arco-nodo», que se ha convertido en uno de los modelos de datos más comunes en los SIG actuales.

Durante las décadas de los años 60s y 70s la tendencia fue a la aparición de los Sistemas de Información Geográfica muy específicos ligados a necesidades concretas, generalmente de las administraciones públicas. De dichas experiencias se han derivado nuevos desarrollos y la extensión de las tecnologías aplicadas a diversos ámbitos, que se han potenciado en los años 80s con la aparición de productos comerciales de uso general.

La década de los 90s se convirtió en el período de la rápida expansión y globalización del mercado y actualmente continua, conformando un sector SIG de enorme potencialidad en el que las aplicaciones y el número de usuarios se multiplican de forma constante y por ende diversificándose a todos los sectores.

### **2.1.3 Importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Sí se toma un momento para pensar sobre algunos de los temas más importantes que el mundo enfrenta actualmente, por ejemplo, contaminación, superpoblación, desastres naturales y demás, cada uno de ellos tiene una dimensión geográfica crítica. Por ejemplo, mapear dónde la calidad del agua se deteriora puede dar nuevas aproximaciones sobre fuentes de contaminación y formas de controlar su emisión.

Temas locales, tales como, ¿porqué las primas de seguros son más elevadas en algunas áreas que en otras?, ¿porqué los plátanos crecen mejor en ciertos suelos que en otros?, ¿porqué se producen embotellamientos de tránsito?, ¿también son afectados por la geografía? Son fácilmente analizados en el entorno de un sistema SIG.

Cuando se considera el impacto de un desastre tal como un terremoto, necesita analizarse información geológica y sísmica, y luego relacionarse con detalles sobre la población, propiedades e infraestructura que han sido o pueden ser afectados.

La solución a muchos problemas frecuentemente requiere acceso a varios tipos de información que sólo pueden ser relacionados por geografía. Sólo la tecnología del Sistema de Información Geográfica permite almacenar y manipular información usando geografía y analizar patrones, relaciones y tendencias en la información, para ayudar a tomar mejores decisiones.

#### **2.1.4 Relación Entre Cartografía Asistida por Computadora (CAC) y el SIG**

El paso de cartografía automatizada ó asistida por computador a un Sistema de Información Geográfica se presenta cuando otro nivel de capacidad es añadido a los sistemas de cartografía automática. Dicho nivel de potencialidad es la posibilidad del tratamiento de las relaciones espaciales entre los objetos cartográficos. Su aplicación al mapa digital implica que dichas relaciones deben estar almacenadas en el computador de tal manera que puedan ser percibidas por el mismo y ser usadas en los procesos. Por ejemplo, las líneas que forman la delimitación de una parcela forman parte de una entidad denominada «parcela», a la cual se les pueden asignar unos atributos que la definan. Dentro de la misma, otro conjunto de líneas puede delimitar una construcción.

El sistema será capaz de determinar que la construcción se encuentra dentro del área de la parcela. A su vez, la construcción puede quedar asociada a la calle por donde se realiza el acceso a la misma.

Dichas posibilidades de análisis geográfico de la información constituyen otro nivel que define y distingue a los sistemas SIG, a los cuales se les denomina *atributos topológicos*.

#### **2.1.5 Componentes Básicos de un SIG**

##### **2.1.5.1 Soporte Físico - Hardware**

Las posibles arquitecturas capaces de soportar un sistema SIG pueden clasificarse según:

- Sistemas integrales o corporativos
- Sistemas abiertos
- Sistemas compactos
- Sistemas combinados
- Microsistemas

La configuración básica y más generalizada que debe ser considerada dentro de un esquema organizacional para poder obtener un funcionamiento óptimo del SIG, consiste en :

- Estación de trabajo (WS), PC u otra plataforma de acuerdo a los requerimientos de cada software a ser implementado.
- Unidades de almacenamiento de datos y de lectura (cintas, discos, CD, etc.).
- Tablero de digitalización
- Impresora o plotter

### 2.1.5.2 Soporte Lógico - Software

Se han mencionado las características y el por qué de un SIG, en las cuales quedaron implícitas las características del software básico SIG, que es el elemento que da consistencia al sistema, hasta el punto de que en frecuentes ocasiones, la terminología SIG se aplica al software específico, en lugar del sistema global, para definirlo.

El software SIG es, fundamentalmente, un gestor de base de datos de características particulares. Este concepto de sistema de manejadores de bases de datos <DBMS> como eje central del software SIG es lo que lo diferencia de otros sistemas de dibujo o diseño automatizado.

En general, puede establecerse una cierta diferencia entre la multiplicidad de software SIG existente, atendiendo a determinadas particularidades o especialización funcional que presentan.

Así, pueden considerarse los Software SIG como:

**ABIERTOS:** La mayoría del software básico en el mercado consiste en un *logical* básico (tipo «caja de herramientas») que permite al usuario, mediante comandos del sistema y lenguaje de macro, generar desarrollos específicos orientados a sus necesidades.

**CERRADOS:** Productos orientados a tareas concretas, no susceptibles de desarrollo ulterior por el usuario final.

**MIXTOS:** Se presentan ante el usuario como una combinación de las anteriores, comprendiendo aplicaciones ya desarrolladas que atienden a tareas

específicas, pero manteniendo la opción de posibles nuevos desarrollos por el propio usuario final.

En función de su *grado de especialización o su* orientación a determinadas tareas, pueden considerarse los orientados a:

- Captura de información
- Análisis espacial
- Análisis de redes
- Simulación y Modelos Tridimensionales del terreno
- Tridimensionales

Considerando su característica de origen y según la filosofía con la que son diseñados, tenemos:

- Derivados de productos CAD, que por ampliación de sus funciones y la incorporación de nuevos módulos orientados al análisis espacial han ido configurándose como SIG.
- Originados desde una concepción inicial como SIG propiamente dicho.

Considerando un carácter general, como sistema, puede concebirse los siguientes subsistemas, integrando cada uno de ellos unas funciones determinadas.

1. Subsistema de adquisición de datos
2. Subsistema de entrada y/o captura de datos
3. Subsistema de manejo de datos
  - Cálculo de superficies
  - Operaciones lógicas: unión, intersección, inclusión
  - Cálculo automático de geocódigos
  - Textos gráfico conectado a datos alfanuméricos
  - Representación tridimensional
  - Conversión raster-vector
4. Subsistema de análisis de Datos
  - Integración, estadísticas, cálculos, análisis social
  - Localización de elemento gráfico a través de su atributo alfanumérico

- Obtención de atributos alfanuméricos relacionados a un elemento gráfico.
- Selección y visualización de elementos espaciales que cumplen determinadas condiciones (espaciales ó de atributos).
- Determinar zonas de influencia alrededor de elementos espaciales.
- Análisis de redes.

#### 5. Subsistema de salidas de datos

- Salidas de información, presentación en pantalla ó impresión, soporte digital ó convencional, etc.
- Generación de ficheros de impresión
- Facilidades para formatos y símbolos
- Informes gráficos y alfanuméricos

## 2.2 Bases de Datos Espaciales

### 2.2.1 Conceptos Iniciales

La actual generación de software SIG, en su mayoría, está basada en el soporte de los sistemas de gestión de bases de datos (DBMS), lo que ha potenciado sus posibilidades, entre ellas, las de trabajar con grandes volúmenes de información, utilizar métodos de búsqueda e interrogación estándares en la Bases de datos, etc.

La utilización de un DBMS como soporte de un sistema SIG puede ser total, de modo que todos los datos quedan almacenados en la BD, ó puede ser parcial, para una solución mixta que combina el soporte de una Base de Datos para archivos de atributos y de relaciones, y archivos convencionales de acceso directo que normalmente son archivos de geometría.

Las ventajas de la utilización de una BD son lo suficientemente conocidas tales como:

- Menor redundancia de datos
- Mantenimiento de la integridad y calidad de los datos
- Eliminación de inconsistencias
- Reducción en el costo para el desarrollo de aplicaciones
- Control y seguridad del acceso a los datos
- Fácil descripción y documentación de los datos (metabase)

- Utilidad de los lenguajes de manipulación, de interrogación, de las herramientas de programación, etc.

Los sistemas más avanzados de DBMS permiten manipular imágenes como si se trataran de otros tipos de datos. Asimismo, el concepto de *objeto* de los DBMS está siendo implementado en muchos productos SIG (DBMS orientadas a objetos, complementado con lenguajes de programación orientadas a objetos).

Los elementos representados en una Base de Datos SIG tienen tres identidades:

- Entidad: Elemento real
- Objeto: Elemento tal como está contemplado en la BD
- Símbolo: Descripción gráfica del objeto/entidad en el mapa

Una *Entidad* es un <fenómeno *real*> que no puede ser dividido o descompuesto en otros «fenómenos» de las mismas características. Por ejemplo una ciudad, si bien puede ser dividida en zonas, distritos u otras particiones, no puede ser subdividida en otras ciudades.

Un *Objeto* es una representación digital de todo o parte de una *Entidad*. Su representación cartográfica dependerá de varios factores (escala, propósito). Por ejemplo, una ciudad podría estar simbolizada mediante un punto, un área u otro símbolo.

Los tipos de objetos espaciales se clasifican en:

- Puntos (0 dimensiones)
- Líneas (1 dimensión)
- Áreas (2 dimensiones)
- Volúmenes (3 dimensiones)

*Atributos* son las características de las entidades representadas, usualmente se trata de características no espaciales, que definen ó etiquetan a dichas entidades, y se organizan en la base datos en forma de archivos de atributos.

Un conjunto de objetos espaciales agrupados de una forma determinada, constituye un NIVEL ó CAPA, también denominado COBERTURA Ó TEMA (por ejemplo, capa hidrográfica, de suelos, etc.)

El principal objetivo del Sistema Manejador de la Base de Datos es el permitir al usuario tratar con los datos sin necesidad de entender como el dato esta físicamente estructurado y almacenado en el computador. Tales sistemas emplean diferentes estructuras de procesamiento tales como:

- Modelo Jerárquico
- Modelo de redes
- Modelos relacionales

Estas estructuras desde el punto de vista conceptual representan las relaciones entre los datos, para tal efecto trataremos la última como la más extendida y aplicada en la actualidad, haciendo además una referencia a las Bases de Datos orientadas a objetos.

### **2.2.2 Estructuras Relacionales**

En una base de datos relacional los datos están almacenados en registros, denominados *tuplas*, conteniendo un conjunto ordenado de valores, agrupados en tablas bidimensionales, denominadas *relaciones*. Cada tabla o relación es un archivo.

Las estructuras de punteros, en los modelos en red, y las llaves, en las estructuras jerárquicas, son sustituidas por datos redundantes, a modo de códigos identificadores, usados como claves únicas para identificar los registros de cada fichero.

En una Base de Datos Relacional los datos son extraídos con procedimientos de interrogación, definiendo el propio usuario las relaciones, que pueden no existir en los ficheros actuales, por lo que el Sistema de Gestión de Bases de Datos (DBMS) utiliza métodos de álgebra relacional para construir las nuevas tablas.

Las bases de datos relacionales tienen la ventaja de que su estructura es muy flexible y pueden satisfacer casi cualquier demanda de interrogación, usando las reglas del álgebra de Boole y de operaciones matemáticas. Permiten que diferentes tipos de datos sean combinados y comparados, haciendo fácil su modificación y ampliación.

La desventaja es que muchas operaciones conllevan búsquedas secuenciales a través de ficheros para localizar los datos que cumplen las relaciones específicas, lo que implica largos tiempos de búsqueda, así como por el volumen ocupado por dichas Bases



de Datos. Por ello se precisa de un buen diseño de las mismas, que haga razonables el tiempo de proceso, lo que, junto con el constante incremento de potencia de los ordenadores, permite una solución eficiente de casi todas las necesidades de los usuarios.

Su aplicación a los Sistemas de Información Geográfica es relativamente reciente (1983), en los 90s los SIG eran soportados con este tipo de base de datos, sin embargo en la actualidad la mayoría de los software SIG están dentro de un entorno de Base de Datos orientados a objetos.

### **2.2.3 Bases de Datos Orientados a Objetos**

Antes de que los sistemas de bases de datos aparecieran, cada programa ó aplicación debía definir sus propios conjuntos de ficheros. La creación de nuevas aplicaciones requería la definición de nuevos ficheros utilizados en otros programas, así como realizar el acceso a datos contenidos en fuentes o ficheros dispares.

Las Bases de Datos permiten una «vista» uniforme de los datos, para todos los programas, bajo una estructura independiente de los mismos, lo que a su vez determina una mayor facilidad y coherencia en la elaboración de los programas y en el manejo de los datos.

Algunos entornos de aplicaciones, como los de diseño gráfico y los que gestionan información geográfica, precisan de unos tipos de base de datos capaces de contener y manipular una complejidad de entidades y objetos que son utilizados en dichas aplicaciones. Estas necesidades han podido ser cubiertas, como ya se ha comentado en los puntos anteriores, mediante las bases de datos convencionales, aún que, por la particularidad de los objetos a almacenar y tratar, parecen adaptarse mejor las denominadas bases de datos orientadas a objetos, que pueden complementarse con programas y lenguajes « orientados a objetos».

Esta nueva generación de bases de datos incorpora tecnología de otros campos, especialmente ingeniería del software e inteligencia artificial.

El modelo de información es representado por clases de objetos. Una clase de objetos (o entidad) es un conjunto común de objetos que comparten características o propiedades. La base de datos

almacena instancias de objetos, definiéndose una «instancia» como un miembro del conjunto representado por una clase de objetos.

Un objeto es una entidad abstracta que define un protocolo a través del cual los usuarios del objeto pueden interaccionar con él. El objeto puede tener un estado encapsulado, almacenado en una parte de memoria «encapsulada». El protocolo de un objeto está definido por un conjunto de mensajes y operaciones.

Por ejemplo, en una aplicación de tráfico automotriz, podrían ser definidas las operaciones siguientes para el objeto «coche»: arranque - parada - cambio de dirección – cambio de velocidad. Un mensaje puede ser enviado a un objeto para conseguir una acción determinada. Los objetos se comunican unos con otros enviándose mensajes.

Los modelos de datos orientados al objeto están caracterizados por su posibilidad de ser referenciados por medio de su identidad, atributo del objeto que permanece invariable ante cualquier modificación de valor del objeto, que no sea su propia autodestrucción. Es evidente que las entidades geográficas son especialmente susceptibles de ser tratadas, en su representación informática, bajo modelos basados en dicho concepto de «objeto».

Actualmente la mayoría de los productos SIG están orientadas a objetos, tal es el caso de los productos ESRI como son ArcInfo 8.0, ArcView 8.0 entre otros.

#### **2.2.4 Diseño de Bases de Datos**

Un elemento fundamental para el correcto funcionamiento de un sistema de información geográfica es la conceptualización y diseño de la base de datos que contendrá la información a tratar. El proceso de definición es probablemente más complejo que el relativo a un sistema alfanumérico y el costo del proceso, para muchas organizaciones, puede ser muy elevado. No obstante es imprescindible asumirlo porque de una buena estructura de datos va a depender del éxito y el rendimiento del SIG.

El proceso de diseño se inicia con la agrupación de las entidades geográficas en grupos homogéneos, en lo que se refiere a:

- Tipos de elementos: lineales, puntuales, superficiales.

- Temática: los elementos deben agruparse en conjuntos temáticos lógicos, por ejemplo: topografía, hidrografía, parcelas, ejes calles, redes, planeamiento, etc.
- Tipo de gestión: aquellos elementos que conlleven un tipo de gestión de los mismos muy diferentes del resto, que se intercepten o que deban relacionarse con atributos y tablas de datos muy dispares, conviene que sean almacenados o tratados como grupos temáticos diferentes.

Una vez determinados, a partir del análisis anterior, los niveles, capas ó temas de elementos geográficos, se deben analizar los atributos descriptivos que deben ser relacionados con cada objeto geográfico, y que se agruparán en tablas o ficheros de la Base de Datos, cuyo diseño ha de definirse en esta fase.

Para el caso de un Modelo Relacional, se identifican los elementos gráficos con códigos numéricos o geocódigos, los cuales, contenidos en un campo de los ficheros de datos gráficos, se relacionarán con un campo idéntico de las tablas de atributos alfanuméricos con los que se prevea unirse. Por ejemplo, en la cartografía catastral el campo de enlace entre las parcelas - objetos cartográficos - y las bases de datos de parcela alfanuméricos pueden ser los códigos catastrales.

El resultado del diseño de la base de datos relacional es un conjunto de capas o niveles que almacenan, cada uno de ellos, objetos gráficos representando entidades geográficas, y que están asociados mediante campos comunes de enlace, con las tablas alfanuméricas con los atributos descriptivos.

Algunos de los elementos que deben intervenir en el diseño de la Base de Datos son:

- Considerar el volumen que hay que mantener on-line
- Frecuencia con que se modifican los datos (volatilidad)
- Aplicaciones a desarrollar
- Formatos y contenido de la información, especialmente si ésta proviene de una fuente exterior al SIG.
- Condiciones del equipo físico
- Factores de organización, soporte y gestión del sistema

Para algunas aplicaciones, los objetos, atributos y ficheros son definidos junto con la definición de la Base de Datos. En otros, por

ejemplo para el análisis espacial, existe la posibilidad o necesidad de definir nuevos objetos y atributos, por lo que es preciso ampliar y redefinir la Base de Datos.

Conviene también tener en cuenta aspectos relativos a:

- Niveles de información (capas)
- Ficheros de atributos
- Interfaz con RDBMS
- Indexación de los datos

La creación de índices o librerías de los archivos es importante cuando el Sistema de Información Geográfica debe gestionar un gran volumen de datos y acceden al mismo muchos usuarios contemplando varios usos diferenciados.

Los objetos cartográficos territoriales quedan definidos por medio de la asignación de un código a cada entidad geométrica, según la tipología de las mismas. Por medio de este diseño se ubican las entidades geográficas y sus características asociadas en los correspondientes objetos cartográficos y tablas de atributos que gestiona el Sistema de Información Geográfica.

### **2.2.5 Bloques y Capas de Información (Tiles - Layers)**

Debido a las apreciables dimensiones que acostumbra contener la Base de Datos del SIG y en orden a una mayor gestión interna de los datos, la información frecuentemente se almacena dividida o particionada por zonas espaciales - división horizontal (por ejemplo: Cartas nacionales topográficas), por temas - División vertical - o ambos a la vez.

El bloque es una partición de la Base de Datos por criterios espaciales (áreas geográficas, hojas, etc.) y la capa o nivel es una partición temática. Estas particiones no obstaculizan una visión completa y global de la Base de Datos por el usuario, y cuentan con la ventaja genérica de permitir una mayor rapidez de acceso a los datos, en la modificación de los mismos, así como en una distribución de la información que puede ajustarse más a las capacidades de almacenamiento de los dispositivos disponibles para ello, sin olvidar también la mayor facilidad para extracción selectiva de información, back-up, etc.

### **2.2.5.1 Criterios Para la Configuración de Bloques**

Pueden cubrir el mismo área o bien tener dimensiones variables. Las de área fija, en general, son ineficientes en términos de almacenamiento, pues no todas las áreas tienen el mismo volumen de información. Dicho handicap no lo tienen los de área variable, por lo que son más eficientes en términos de almacenamiento, aunque son más complejos de reestructurar después de introducir modificaciones.

Los límites de las áreas pueden ser: hojas, límites políticos administrativos, entramado de carreteras, grillas o mallas construida expresamente, etc.

### **2.2.5.2 Criterios Para la Selección de Capas / Niveles**

Con carácter general es aconsejable mantener la información genérica común a todas las posibles capas en una sola capa, que puede recrearse junto con las otras, a conveniencia. Así, por ejemplo, en las bases cartográficas catastrales, en una única capa se dispone la información geográfica de base: topografía, hidrografía, vías de comunicación, etc., manteniendo el resto de información en distintas capas de parcelas, manzanas, lotes, área construida, urbanizaciones, etc.

Asimismo, conviene tomar en consideración otros factores, tales como requerimientos funcionales y del usuario, fórmulas de modificación de datos, posibilidades del sistema, etc.

La distribución de la información en varias capas tiene como ventajas principales:

- Optimiza la explotación
- Mayor sencillez de diseño
- Adaptabilidad a otros entornos
- Mejor solución para análisis y consulta

Siendo sus desventajas:

- La necesidad de generar una capa única para la actualización y extracción de información.

- Mayor ocupación en disco

Por su parte, la configuración de una capa única aporta como ventajas:

- Mayor facilidad y seguridad en la actualización de datos.
- Garantiza la integridad de la Base de Datos.
- Optimiza el almacenamiento en disco

Y como inconvenientes:

- Disminuye la eficacia de la explotación
- Menos adaptable a entornos diferentes

En el caso más usual de un diseño estratificado en capas o niveles, las actividades de mantenimiento y actualización deben realizarse sobre objetos agrupados, integrando todas ó varias de las capas existentes en una sola, para identificar y tratar las coincidencias entre las primitivas gráficas que pudieran alterarse ó sufrir modificaciones en la gestión de actualización. Posteriormente el proceso inverso permite devolver la información a los diferentes niveles o capas en que la información está distribuida en la Base de Datos.

## **2.2.6 Carga y Generación de la Base de Datos**

La secuencia de los procesos que se inician con la captura de la información y el previo diseño de la base de datos que deberá contener la misma, tiene su continuidad en la carga de la información capturada (elaborada directamente o procedente de fuentes exteriores en formato digital) en la Base de Datos ya conformada en un diseño específico. Dicho proceso de carga implica una auténtica generación de la base, generando simultáneamente la construcción de la topología, con el almacenamiento interno de las relaciones espaciales en ficheros especiales, la comprobación y depuración automática de errores topológicos bajo unas tolerancias predeterminadas, la distribución de los datos capturados en los diferentes estratos o niveles en que se ha estructurado la Base de Datos, la indexación de los anteriores, su partición en bloques, si procede, etc.

Parece evidente que el conjunto, meramente enunciado, de operaciones que se precisa llevar a buen término para poder disponer de la información preparada para una eficaz y correcta explotación de la misma, no es, en absoluto, sencillo, y constituye, junto con un adecuado diseño de la Base de Datos, una fase condicionante de primera magnitud para el éxito del Sistema de Información Geográfica.

### **2.2.7 Bases Cartográficas Digitalizadas**

Los datos geográficos digitalizados y almacenados en el computador conforme a una determinada estructura de tablas/ficheros o estructura de datos, conforman lo que se denomina Base Cartográfica Digitalizada. En general el soporte lógico de estos datos se basa en la utilización de las bases de datos, definidas como «colecciones de datos interrelacionados, sin repeticiones, que permiten la utilización de programas o aplicaciones específicas de análisis y gestión».

Las bases de datos cartográficas almacenan en forma magnética la información territorial referenciada; permiten añadir de forma independiente atributos que los complementan; son capaces de acoger relaciones jerárquicas y topológicas entre sus elementos y facilitan apoyar en ellos aplicaciones informáticas de gestión, análisis y transformación con vistas a la explotación racional de los conceptos cartográficos que contienen. El paralelismo con las estructuras de datos alfanuméricos es total, salvo con algunas particularidades propias del tipo de datos manejados.

La estructura de las Bases Cartográficas es primordial para conseguir que el modelo que constituye esta base de datos proporcione directamente, y como mínimo, toda la información que habitualmente se extrae de los planos, mapas e imágenes.

En un Sistema de Información Geográfica vectorial orientado al análisis espacial, la estructura debe contemplar y manejar los conceptos siguientes:

- Entidad geográfica, nodo, tramo, atributos, relaciones topológicas, descripción geométrica, modelos digitales del terreno.
- Dicha estructura necesita medios para ser soportada fuera de las bases de datos, en sus procesos de entrada y/o salida. Estos

medios son tablas que describen la geometría, relaciones y características de los objetos citados en la estructura, formando el concepto de formato de estructura de datos de las bases cartográficas digitalizadas.

### **2.2.8 Formatos de Datos Para Intercambio de Información Cartográfica Digitalizada**

Se ha visto cómo el propio SIG puede capturar datos cartográficos, almacenarlos, para su gestión y tratamiento, en ficheros bajo una estructura determinada, apta para las funcionalidades que se esperan obtener. Pero también el SIG puede alimentarse de información digitalizada, proveniente de diversas fuentes, información que es cargada y almacenada en el SIG, disponiéndola y distribuyéndola en ficheros bajo una estructura determinada. A su vez, el SIG puede elaborar información para otros sistemas.

Todos estos procesos precisan unas formas de transferir información de un sistema a otro, lo que se realiza con el establecimiento de unos formatos de datos para dicho intercambio, según la definición dada en el anterior apartado. Existen organizaciones internacionales ocupadas en la definición de estándares de intercambio de datos: ANSI, DCDSIF, ISO/OSI, etc. En la práctica, no obstante, la mayoría de estándares se establecen por la vía fáctica y aceptación continua y extensa por los usuarios.

En el ámbito de la información geográfica, mención especial merecen los siguientes formatos:

GBF/DIME:	Census Bureau de los EEUU
TIGER:	Census Bureau de los EEUU
IGES:	National Bureau of Standards (EEUU)
SIF:	Standard Interchange Format (Intergraph)
DXF:	Digital Exchange Format (Autodesk - Autocad)

## **2.3 Análisis y Modelamiento de Datos**

El análisis espacial de datos es utilizado para modelar, hacer predicciones y para poder llegar a conclusiones sobre problemas de interés. Tales análisis involucran combinaciones de datos desde múltiples categorías de datos espaciales y ejecuciones de mediciones, análisis, estadísticas y



otras operaciones sobre el conjunto de los datos del Sistema de Información Geográfica para transformarlos en información adecuada y óptima para una aplicación determinada.

### **2.3.1 Análisis de Datos**

Los análisis de datos en un SIG son hechos sobre los datos espaciales, los atributos no espaciales o en ambos espaciales y no espaciales, usualmente de una manera interactiva. Estos análisis pueden ser muy simples o sumamente complejos, llegando a la utilización de diferentes modelos de simulación o predicción.

Un objetivo del análisis de datos es la extracción o búsqueda de información útil para satisfacer cierto objetivo o requerimiento del usuario. Las extracciones de información típicas incluyen:

- La extracción de datos mediante especificaciones geométricas, introduciendo un dominio espacial, punto, línea o área, extraer todas las entidades espaciales y atributos contenidos total o parcialmente en el dominio.
- La extracción de datos mediante condiciones geométricas, introduciendo un dominio espacial y una condición geométrica, por ejemplo extraer toda la información de suelos situada a un radio de 3 Km de un pozo de irrigación.
- La extracción de datos mediante especificaciones simbólicas, extraer información introduciendo un nombre propio o una codificación de un atributo, por ejemplo, extraer atributos de los suelos de la serie Paz.
- La extracción de datos mediante condición simbólica o lógica, extraer información de atributos que satisfagan condiciones alfanuméricas con expresiones lógicas (booleana) por ejemplo, buscar- todas las series de suelos que tengan un rango en pH de 6,5 a 7,5 y textura limo-arcillosa.

Ejemplos muy típicos de aplicaciones de extracción de datos incluyen

- Dónde se encuentran los cultivos de maíz
- Dónde está el suelo A con relación a la carretera principal
- Qué tipo de textura tienen los suelos en un punto X, Y

- Cuál es la distancia más corta entre A y B pasando por C y con óptimas cualidades de recreación.
- Tierras de pastoreo con pendiente A y B
- Tierras de cultivos sobre tierras aptas y con pendiente A y B

### **2.3.1.1 Operaciones Principales de Análisis de Datos Geográficos**

*Reclasificación de Categorías del Mapa:* Involucra la reasignación de valores temáticos a las categorías de un mapa existente como una función del valor inicial, la posición, el tamaño o la forma de la configuración espacial asociada con cada categoría. El análisis de reclasificación se puede hacer en una sola capa ó en varias, como parte de un proceso de superposición de capas.

La generalización es el proceso de hacer la reclasificación menos detallada combinando clases. Se la utiliza a menudo para reducir el nivel de clasificación enfatizando una característica determinada.

*Superposición de Mapas:* resultan en la creación de un mapa nuevo donde los valores asignados a cada localización en ese mapa son calculados como una función de valores indiferentes asociados con esa localización en dos o más mapas existentes. Las operaciones de superposiciones lógicas y aritméticas incluyen operaciones como adición, resta, multiplicación y división de cada valor de una capa por el valor en la localización correspondiente de la segunda capa. La superposición lógica involucra el encontrar aquellas áreas donde un juego determinado de condiciones ocurre (o no ocurre) en forma conjunta.

Los modelos de vectores y celdas difieren considerablemente en la manera que estas operaciones son realizadas. Operaciones de superposición son usualmente ejecutadas más efectivamente en sistemas de celdas.

*Determinación de Distancias y Conectividad:* donde las operaciones para la medición cartográfica de distancias, involucran la creación de mapas nuevos, en los que la

distancia y ruta entre puntos puede ser expresada como una simple distancia euclidiana o como una función de barreras absolutas y/o relativas.

*Caracterización de Vecindades Cartográficas:* involucra la creación de un nuevo mapa basado en "ventanas móviles" de puntos vecinos alrededor de localizaciones seleccionadas; en esta categoría de análisis espacial de datos se incluye el análisis de modelos digitales del terreno.

Las operaciones entre dos mapas generalmente involucran la comparación o superposición de los mapas para producir otro mapa, dentro las que se tienen:

- Configuraciones, por ejemplo para detectar cambios en uso de la tierra.
- Producción de tablas cruzadas para establecer relaciones estadísticas entre dos juegos de atributos.
- Superposición de mapas para combinar mapas, por ejemplo, de suelos con las edificaciones existentes de una región. De pendientes para obtener un mapa de la mejor ubicación, como cuales son las posibles zonas para expansión urbana.
- Búsqueda con condicionamiento, por ejemplo ubicar todos los suelos profundos y bien drenados en pendientes menores a 5% y a menos de 20 Km. del centro agrícola principal.

Las operaciones de superposición de mapas involucran funciones de transformaciones en puntos, áreas, vecindades y tiempo. Las transformaciones puntuales más simples son aquellas operaciones matemáticas de adición, sustracción, multiplicación, división, como también computación de valores extremos o la aplicación de operaciones lógicas booleanas.

Transformaciones relacionadas a propiedades de una región. Estas propiedades pueden ser: largo, área, perímetro o forma. Las transformaciones de funciones que relaciona un punto a sus vecinos, son aquellas

funciones que utilizan alguna clase de relación espacial para determinar el valor del nuevo mapa.

Las funciones de vecindad incluyen cálculos de gradiente y dirección de pendiente y otros tipos de interpolación espacial. La cuarta clase de operaciones involucra variaciones de patrones como función de tiempo. Un ejemplo es la variación de uso de la tierra, el cambio de un mapa de aptitud del terreno debido a cambios en los suelos como función del tiempo.

### **2.3.2 Modelamiento Cartográfico**

El modelamiento de datos espaciales involucra el uso de un modelo que es una representación simplificada de la realidad. Este modelo presenta relaciones en una forma generalizada, en otras palabras, es una aproximación selectiva de la realidad.

Existen tres categorías principales de modelos:

- *Modelos Descriptivos*: Son aquellos que caracterizan o describen el mundo real. Un mapa es un ejemplo de este modelo.

*Modelos Predictivos*: Son los que estiman lo que pueda suceder bajo ciertas condiciones. Ejemplos de modelos predictivos son aquellos de estimación de daños y pérdidas debido a sismos como los que se presentan en este estudio.

- *Modelos de Decisión*: Son aquellos que sugieren el curso de acción que se debe seguir en respuesta a ciertas circunstancias. Estos modelos pueden ser considerados como recomendaciones estructuradas, usadas conjuntamente con modelos descriptivos y de predicción.

Los Sistemas de Información Geográfica son muy útiles en la creación de modelos utilizando una serie de reglas y operaciones cartográficas. Generalmente realiza modelamientos cartográficos utilizando técnicas de reducción del problema. Con esta técnica el modelo conceptual (problema) se descompone en submodelos que pueden ser resueltos separadamente. El modelo está compuesto de tal forma que las soluciones de los submodelos individuales pueden ser combinadas, de manera que proporcionen la solución al modelo original. Cada submodelo puede ser descompuesto en

modelos más pequeños, los que pueden ser resueltos directamente.

El método básico del análisis de decisión es el de romper un problema de decisión en partes componentes, de esta manera, permiten al especialista concentrarse en los puntos más críticos. El patrón de relaciones que permite la descomposición del modelo, es referido como modelo de decisión.

Los modelos en un Sistema de Información Geográfica ofrecen varias ventajas posiblemente más que en otras metodologías, en el sentido de que el analista debe formular el problema (objetivo) muy claramente, decidir el tipo de datos necesarios y si es necesario el de recolectarlo. Luego debe definir los procesos cartográficos y las relaciones espaciales de una manera precisa. Permiten la posibilidad de crear y definir una serie de escenarios que son examinados de una manera rápida, sin embargo, también existen desventajas en el uso de modelos, en el sentido de que algoritmos algebraicos utilizados en procesos de automatización de datos asumen que todos los datos son absolutamente correctos. La otra suposición que se hace es que las superficies espaciales carecen de variabilidad espacial.

Es importante señalar que el uso de procedimientos y procesos exactos sobre datos inexactos no hacen que los resultados sean más exactos. Otro aspecto muy importante es que todo proceso de modelamiento debe ser evaluado, verificado y recién después de comprobar los errores aceptarlo y usarlo en los procesos de toma de decisiones.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE FENÓMENOS GEODINÁMICOS EN LA CIUDAD DE MOQUEGUA

#### 3.1 Introducción

El peligro ó la amenaza tiene un concepto muy amplio, así desde el punto de vista conceptual se entiende como el riesgo externo de un elemento ó grupo de elementos expuestos, que se expresa como la probabilidad de que un suceso se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y dentro de un periodo de tiempo definido, diferenciándose dos grandes grupos de acuerdo a su origen: amenazas naturales y amenazas antrópicas.

Una de las diferentes maneras de clasificar los fenómenos naturales generadores de amenazas puede ser: fenómenos hidrológicos, atmosféricos, geodinámicos. Los fenómenos de origen tectónico como los sismos, erupciones volcánicas, tsunamis y las grandes deformaciones del suelo corresponden a los fenómenos geodinámicos.

La ocurrencia de fenómenos hidrológicos, como inundación por nombrar uno de ellos, es también advertida en la evaluación realizada por la UNSA-INDECI (2001) en la zona de estudio y para lo cual son necesarios entre otros, estudios hidrológicos. El presente estudio solo está enmarcado en lo referente a los fenómenos geodinámicos relacionados con los sismos y sus efectos colaterales debido a que estos son amenazas de mayor importancia a la que está expuesta la ciudad de Moquegua.

En este capítulo se analiza el peligro sísmico y sus efectos colaterales en la ciudad de Moquegua. En tal sentido, se presenta una revisión de la sismicidad histórica y la sismotectónica de la región, así como también sus características locales: topografía, geología, geomorfología, suelos. El peligro sísmico se evalúa por el método probabilístico aplicando la metodología implementada en el programa RISK por McGuire(1976), y dentro de los efectos de sitio se analizará el más importante, es decir la amplificación sísmica usando las mediciones de microtrepidaciones realizadas en el proyecto UNI-CONCYTEC (2002), para finalmente generar los planos de amenaza sísmica para tres sismos escenarios.

## 3.2 Peligro Sísmico-

### 3.2.1 Sismicidad Histórica

Debido a su ubicación próxima a la zona de subducción de las placas de Nazca y Continental, la ciudad de Moquegua ha sido afectada por muchos movimientos sísmicos desde la antigüedad. El Dr. Enrique Silgado Ferro, en su publicación "La Historia de los Sismos más Notables Ocurridos en el Perú" (1978), presenta una relación bastante completa de los terremotos históricos reportados desde la época de la conquista, de los cuales se han identificado los siguientes para el área en estudio:

*Entre los años de 1471 – 1490*, gran terremoto que destruyó el primitivo asiento de la ciudad de Arequipa, fue la época del Inca Túpac Yupanqui, en la cual perecieron todos sus habitantes y hubo erupción del volcán Misti, alcanzando una intensidad de VIII en la Escala Modificada de Mercalli.

*Entre los años de 1513 – 1515*, ocurrieron grandes sismos acompañados de formidables deslizamientos de tierra de algunos cerros altos, en la costa el mar sobrepasó muchas veces la línea de la playa. En Arequipa alcanzó intensidades de VIII en la Escala Modificada de Mercalli

*22 de Enero de 1582*, a las 11:30 de la mañana un terremoto destruyó la ciudad de Arequipa, pereciendo mas de 30 personas entre los escombros. El movimiento sísmico alcanzó una intensidad de X en la Escala Modificada de Mercalli en la zona de Socabaya y IX en Arequipa. El movimiento se percibió también en Lima.

*En el año de 1590*, un fuerte sismo sentido en casi toda la Costa del Sur del Perú destruyó el pueblo de Camaná, generando la salida del mar y el represamiento del río.

*19 de Febrero de 1600*, a las 05:00 ocurrió un fuerte sismo causado por la explosión del volcán Huaynaputina (Omate). La lluvia de ceniza oscureció el cielo de la ciudad de Arequipa y se desplomaron todos los edificios con excepción de los más pequeños. El movimiento alcanzó una intensidad de XI en la Escala Modificada de Mercalli.

*24 de Noviembre de 1604*, a las 13:30 horas un gran movimiento sísmico destruyó las ciudades de Arequipa y Arica. Un tsunami destruyó la ciudad de Arica y el puerto de Pisco. Como consecuencia del Tsunami murieron 23 personas en Arica. El movimiento tuvo una intensidad de

· VIII en la Escala Modificada de Mercalli en las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna y Arica.

*31 de Marzo de 1650*, a las 14:00 horas ocurrió un terremoto en el Cuzco que dejó la ciudad en ruinas. Se produjeron grandes deslizamientos en Pisac y Paucartambo, donde el movimiento alcanzó una intensidad de IX en la Escala Modificada de Mercalli. El movimiento fue sentido hasta Lima.

*20 de Octubre de 1687*, a las 06:30 un gran movimiento sísmico ocurrió en la ciudad de Arequipa causando serios daños en templos y viviendas. A causa de este movimiento se produjo un agrietamiento de muchos kilómetros de extensión entre Ica y Cañete. En Aplao y Siguanaco tuvo una intensidad de VIII en la Escala Modificada de Mercalli.

*22 de Agosto de 1715*, a las 19:00 horas. Sismo destructor en el Sur. En Arequipa averió casa, quedando muchas inhabilitadas. El viajero francés Le Barbinais Le Gentil que había llegado a comienzos de Julio al puerto de Arica decía que hubo un temblor tan extraordinario que se hizo sentir en 200 leguas a la redonda, trastornando Arica, Tacna, Moquegua, Arequipa y otros pueblos.

*10 de Febrero de 1716*, terremoto en el pueblo de Torata en Moquegua, que causó gran mortandad, salvándose solo el cura que había salido al campo a administrar sacramentos.

*27 de Marzo de 1725*, conmoción en toda la Costa Sur del Perú debido a un gran sismo. Sufrió daños el pueblo de Camaná, saliéndose el mar.

*8 de Octubre de 1831*, a las 21:15 horas ocurrió un temblor muy fuerte en Tacna, Arica, Moquegua y en el interior del departamento de Arequipa. En Arica resultaron varios muertos y heridos como consecuencia del desplome de varias casas. Sentido en Sucre, Oruro y en otros lugares de Bolivia.

*18 de Setiembre de 1833*, a las 05:45 horas un movimiento sísmico redujo a escombros parte de la ciudad de Tacna y causó daños en Moquegua, Arequipa, Sama, Arica, Torata, Locumba e Ilabaya. Dejó un saldo de 18 muertos y 25 heridos. Sentido en La Paz, Cochabamba y Bolivia.

*13 de Agosto de 1868*, a las 16:45 ocurrió un terremoto en la región sur del Perú que alcanzó una intensidad de grado XI y fue acompañado de un tsunami. El historiador Dr. José Toribio Polo se refiere a este sismo



como uno de los mayores que se hayan registrado en el Perú desde su conquista. Las observaciones macro sísmicas indicaron que el epicentro del terremoto estuvo cerca del puerto de Arica. El movimiento se percibió hasta unos 1,400 km al NW (Samanco, Perú), a una distancia igual hacia el Sur (Valdivia, Chile), y hasta unos 224 km al Este en dirección a Cochabamba, Bolivia. El radio del área más conmovida abarcó como unos 700 km<sup>2</sup>.

En Arequipa se cayeron la mayor parte de los templos, el portal nuevo, el local del Cabildo y muchos establecimientos públicos y privados. La Catedral quedó en ruinas. Según testigos la tierra crujía y ondulaba siendo difícil permanecer en pie. Sufrieron otras graves ruinas las ciudades de Moquegua, Torata, Tacna y Arica. Las estadísticas de la época señalan que como consecuencia del terremoto murieron más de 180 personas en todo el Sur y unas 300 en Arica.

*03 de Noviembre de 1869*, a las 19:30 horas se produjo un fuerte temblor local en Arequipa que causó deterioros en los edificios, alcanzando una intensidad de VI en la Escala Modificada de Mercalli.

*09 de Mayo de 1877*, a las 20:28 un violento movimiento sísmico sacudió las poblaciones de Ilo, Mollendo, Arica y otras. Se produjo un tsunami que inundó el puerto de Ilo y destruyó parte del ferrocarril. En la ciudad de Arica el mar avanzó más de 600 metros. Esa misma noche se produjeron como 100 réplicas. La ola sísmica originada por este sismo se extendió casi por todo el Pacífico, llegando hasta las costas de Nueva Zelanda y Yokohama en Japón.

*23 de Enero de 1878*, terremoto sentido en Arequipa y Tacna, cayeron varias casas en el antiguo Tarapacá. El oleaje marino producido por esta conmoción inundó los pueblos costeros del Sur.

*04 de Mayo de 1906*, a las 19:36 se produjo un fuerte temblor en Mollendo, generando el derrumbe de casas en la ciudad de Tacna. Se sintió fuertemente en la ciudad de Arica y aún en Iquique.

*28 de Julio de 1913*, a las 01:40 ocurrió un movimiento sísmico que afectó gran parte de la costa sur situada entre Chala y Mollendo, causando roturas de tres cables submarinos frente a la costa, lo que fue atribuido a un deslizamiento de un talud submarino.

*06 de Agosto de 1913*, a las 17:13 un terremoto destruyó la ciudad de Caravelí, produciendo el desplome de todos los edificios de dicha ciudad y derrumbes de las laderas del valle. En Caravelí y Chuquibamba

alcanzó una intensidad de VIII en la Escala Modificada de Mercalli y en Ocoña y Caylloma una intensidad de VI.

*11 de Octubre de 1922*, a las 09:50 un fuerte sismo que causó daños considerables en Arequipa, Caravelí y Mollendo. Fue sentido fuertemente en Chala, Acarí, Puquio, Palpa, Ica y Cañete. En Arequipa y Mollendo se sintió con una intensidad de VI de la Escala Modificada de Mercalli.

*11 de Octubre de 1939*, a las 09:51 horas, el observatorio sismológico de Lima, registraba un movimiento sísmico proveniente de unos 650 km al SE de Lima. Las comunicaciones venidas del Sur informaban que el pueblo de Chuquibamba, situado en el valle del río Majes había sido afectado. Su iglesia, la Cárcel y la Municipalidad sufrieron graves daños y con desplome de muchas casas. El sismo causó otros daños en los edificios de las ciudades de Arequipa y Moquegua. Con gran intensidad se sintió en las poblaciones de Puquio, Quicacha, Palpa, en los puertos de Chala y Mollendo. El movimiento alcanzó una intensidad de VII en Chuquibamba y en Arequipa y Mollendo alcanzó una intensidad de VI en la Escala Modificada de Mercalli.

*24 de Agosto de 1942*, a las 17:51 horas. Terremoto en la región limítrofe de los departamentos de Ica y Arequipa, situada entre los paralelos 14° a 16° Latitud Sur. El movimiento alcanzó una Intensidad de grado IX MMI, y fue sentido en un área de unos 18,000 km<sup>2</sup>, donde ocurrió gran destrucción. Murieron 30 personas por los desplomes de las casas habitación y 25 heridos por diversas causas. Fue sentido con intensidad III - IV de la misma escala en un área elíptica aproximada de unos 408,000 km<sup>2</sup>, la cual comprendía el Norte de la ciudad de Huaraz, al NE Cerro de Pasco y Oxapampa, al Este Cusco y al Sur Moquegua.

*11 de Mayo de 1948*, las 03:56 horas. Un fuerte movimiento sísmico en la región sur afectó parte de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Los efectos destructores fueron máximos dentro de un área aproximada de 3,500 km<sup>2</sup>, dejando un saldo 1 muerto y 66 heridos. En la ciudad de Moquegua se sintió con una intensidad de VII y en Arequipa con intensidad de VI en la Escala Modificada de Mercalli.

*20 de Julio de 1948*, a las 06:03 horas. Sismo ligeramente destructor en las poblaciones de Caravelí y Chuquibamba departamento de Arequipa, intensidad VI – VII MMI. Sentido en Lima (intensidad II), en Arequipa, Moquegua (intensidad III) y en Ayacucho al Este.

*3 de Octubre de 1951*, a las 06:08 horas ocurrió un fuerte temblor en el Sur. En Tacna se cuartearon los Muros de una construcción moderna de concreto y se produjo el derrumbe de una antigua construcción de adobe. Intensidad VI MMI. Fue sentido en Moquegua con una intensidad de V y fuertemente en la costa al Sur de la frontera con Chile.

*26 de Febrero de 1952*, a las 06:31 horas se sintió un prolongado y suave movimiento ondulatorio en el Cusco, donde provocó fuertes desprendimientos del estuco de varias casas. Generó alarma en la ciudad de Arequipa. Fue sentido también en los pueblos de Paruro, Anta, Izcuchaca, Moquegua y La Paz, Bolivia.

*15 de Enero de 1958*, a las 14:14 horas. Terremoto en Arequipa que causó 28 muertos y 133 heridos. Intensidad ligeramente superior al grado VII MMI. El movimiento fue sentido desde Chíncha (paralelo 11o) hasta Tarapacá, Chile (paralelo 21o) y hacia el Este, en Cusco, Puno y en otras localidades del Altiplano.

*19 de Julio de 1959*, a las 10:07 horas. Intenso y prolongado movimiento sísmico sentido en Arequipa, Moquegua, Cusco, Puno, Tacna y en el Norte de la República de Chile hasta Antofagasta. Ocasiónó algunos daños en las torres de los templos de Moquegua, rotura de las redes de distribución de agua potable en Arequipa.

*13 de Enero de 1960*, a las 10:40 un fuerte terremoto en el departamento de Arequipa que dejó un saldo de 63 muertos y centenares heridos. El pueblo de Chuquibamba quedó reducido a escombros, siendo igualmente destructor en Caravelí, Cotahuasi, Omate, Puquina, Moquegua y la ciudad de Arequipa. En el área epicentral la intensidad fue de grado VIII en la escala MSK. En Lima fue sentido con intensidad III y en la ciudad de la Paz con intensidad de III – IV.

*09 de Marzo de 1960*, a las 18:54 se produjo una violenta réplica del terremoto del 13 de Enero, en la ciudad de Arequipa se cayeron las cornizas removidas. Este sismo fue sentido en Puno, en los Puertos de Matarani y Mejía tuvo una intensidad de V en la Escala Modificada de Mercalli. En la ciudad de Arequipa alcanzó una intensidad de VIII.

*24 de Enero de 1964*, a las 04:00 se produjo un sismo en el sur del Perú. Este sismo tuvo una intensidad de VI en la Escala Modificada de Mercalli en la ciudad de Arequipa, y en Mollendo y Ubinas alcanzó una intensidad de V.

### *Actividad Sísmica Reciente*

16 de Febrero de 1979, a las 05:08 un fuerte terremoto sacudió el departamento de Arequipa, ocasionando algunas muertes y muchos heridos. Este sismo produjo severos daños en las localidades de Chuquibamba y pueblos del valle de Majes. Alcanzó una intensidad máxima de VII en la escala MSK, y en la ciudad de Arequipa tuvo una intensidad de VI en la misma escala.

La actividad histórica muestra que en épocas recientes la ciudad de Moquegua ha estado expuesta a un gran número de movimientos sísmicos moderados, que han generado niveles de daños leves a moderados. Sin embargo la alta actividad sísmica de esta región hacía evidente la existencia de un silencio sísmico de más de 100 años para movimientos de gran magnitud.

*El Sismo del 23 de Junio del 2001 en la Región Sur Occidental del Perú,* a las 3:33 de la tarde en tiempo local ocurrió un terremoto en la región sur del Perú. El epicentro de este evento está localizado a 16.15° de la Latitud Sur y 73.40° de Longitud Oeste, el cual está ubicado a 82 Km. al noroeste de la ciudad de Ocoña, en la zona de subducción de las placas de Nazca y Sudamericana. De acuerdo a la evaluación realizada por el Geological Survey de Estados Unidos (USGS) la magnitud revisada de este evento alcanzó el valor de Mw 8.4 (Magnitud Momento o Magnitud de Kanamori), y según el Instituto Geofísico del Perú (IGP) el terremoto tuvo una magnitud Ms 7.9 en la escala de Richter. La Figura 3-1 muestra la localización del epicentro y la distribución de réplicas registradas durante este evento.

Este terremoto ocasionó daños severos en las ciudades de Ocoña, Camaná, Ilo, Moquegua, y partes de la ciudad de Tacna, asimismo, ocasionó daños moderados en la ciudad de Arequipa y poblaciones aledañas, así como en las ciudades de Arica e Iquique en el norte de Chile.

Los daños en edificaciones, puentes y carreteras son variados en la región, algunos de los cuales reflejan claramente la influencia de las condiciones locales del terreno. Los daños en edificaciones adecuadamente construidas son principalmente no estructurales, y la mayoría de daños estructurales han ocurrido en las edificaciones de adobe y de albañilería no confinada o no reforzada adecuadamente. La ciudad mas afectada fue Moquegua, donde alrededor del 80% de las edificaciones de adobe, por lo general bastante antiguas, han colapsado.

Según Defensa Civil, el número de muertos por este desastre asciende a 104 y cerca de 4000 personas heridas. En la región afectada, un total de 59,000 viviendas fueron dañadas o destruidas por este terremoto. La Figura 3-2 presenta un mapa de isosistas que muestra la distribución de daños registrados en esta región.

### **3.2.2 Sismotectónica de la Región Sur Occidental del Perú**

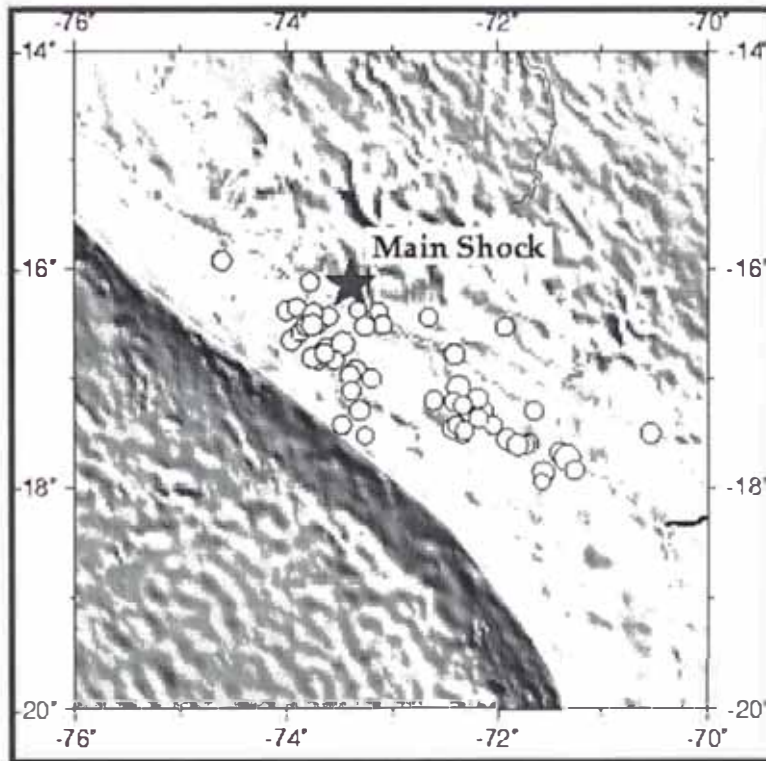
El Perú está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica que hay en la Tierra, formando parte del Cinturón Circumpacífico. El marco tectónico regional a mayor escala está gobernado por la interacción de las placas de Nazca y Sudamérica. Los principales rasgos tectónicos de la región occidental de Sudamérica, como son la Cordillera de los Andes y la fosa oceánica Perú-Chile, están relacionados con la alta actividad sísmica y otros fenómenos telúricos de la región, como una consecuencia de la interacción de las dos placas convergentes cuya resultante más notoria precisamente es el proceso orogénico contemporáneo constituido por los Andes.

La Placa Sudamericana crece de la cadena meso-oceánica del Atlántico, avanzando hacia el noroeste con una velocidad de 2 a 3 cm por año y se encuentra con la Placa de Nazca en su extremo occidental, constituido por la costa Sudamericana del Pacífico. Por otro lado, la Placa de Nazca crece de la cadena meso-oceánica del Pacífico Oriental y avanza hacia el Este con una velocidad de aproximadamente 5 a 10 cm por año, subyaciendo debajo de la Placa Sudamericana con una velocidad de convergencia de 7 a 12 cm por año (Berrocal et al, 1975).

Como resultado del encuentro de la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca y la subducción de esta última, han sido formadas la Cadena Andina y la Fosa Perú-Chile en diferentes etapas evolutivas. El continuo interaccionar de estas dos placas da origen a la mayor proporción de actividad sísmica de la región occidental de nuestro continente. La Placa Nazca se sumerge por debajo de la frontera Perú-Brasil y noroeste de Argentina, lo cual es confirmado por la distribución espacial de los hipocentros, aún cuando existe cierta controversia debido a la ausencia de actividad sísmica entre los 300 y 500 Km de profundidad (Berrocal et al, 1975).

El régimen de esfuerzo regional tectónico parece ser predominantemente compresional, normal a las líneas de la Costa y a la dirección de las Cordilleras.

La parte occidental del área de estudio está constituida por varias unidades tectónicas de diferentes grados de deformabilidad, debido a su diferente litología y época de formación. La unidad de deformación Precambriana no presenta actividad sísmica, mientras que la unidad de deformación Paleozoica presenta actividad sísmica de profundidad superficial a intermedia, tal como se observa en la zona de Huaytapallana cerca a Huancayo, así como en Cusco y en Abancay.



**Figura 3-1:** Mapa de Localización del Epicentro y Distribución de Réplicas (IGP, 2001)

El proceso de colisión de la placa de Nazca y la placa continental Sudamericana es causante de todos los procesos orogénicos que se desarrollan en el continente, dentro de los cuales se puede mencionar los siguientes (Pomachagua, O., 2000):

**La Fosa Marina.** La fosa marina indica de Norte a Sur y paralelo al litoral costero, el límite de contacto entre la placa oceánica y la placa continental. Este límite tiene la forma de una fosa de gran extensión, la misma que alcanza profundidades de hasta 8000 m. Esta fosa está formada por sedimentos que han sido depositados sobre rocas pre-existentes.

**La Cordillera Andina.** La Cordillera Andina se ha formado como producto del proceso de compresión entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana en diferentes procesos orogénicos. Esta cordillera está

conformada en general por rocas ígneas plutónicas que afloraron a la superficie terrestre por procesos tectónicos. La Cordillera Andina se distribuye en el Perú de Norte a Sur, alcanzando un ancho de 50 Km aproximadamente en las regiones Norte y Centro, y hasta de 300 Km en la región Sur. Así mismo, la Cordillera Andina se orienta en promedio en dirección NW-SE, aunque a la altura de la latitud 13°S ésta se orienta en dirección E-W, a lo largo de la deflexión de Abancay.

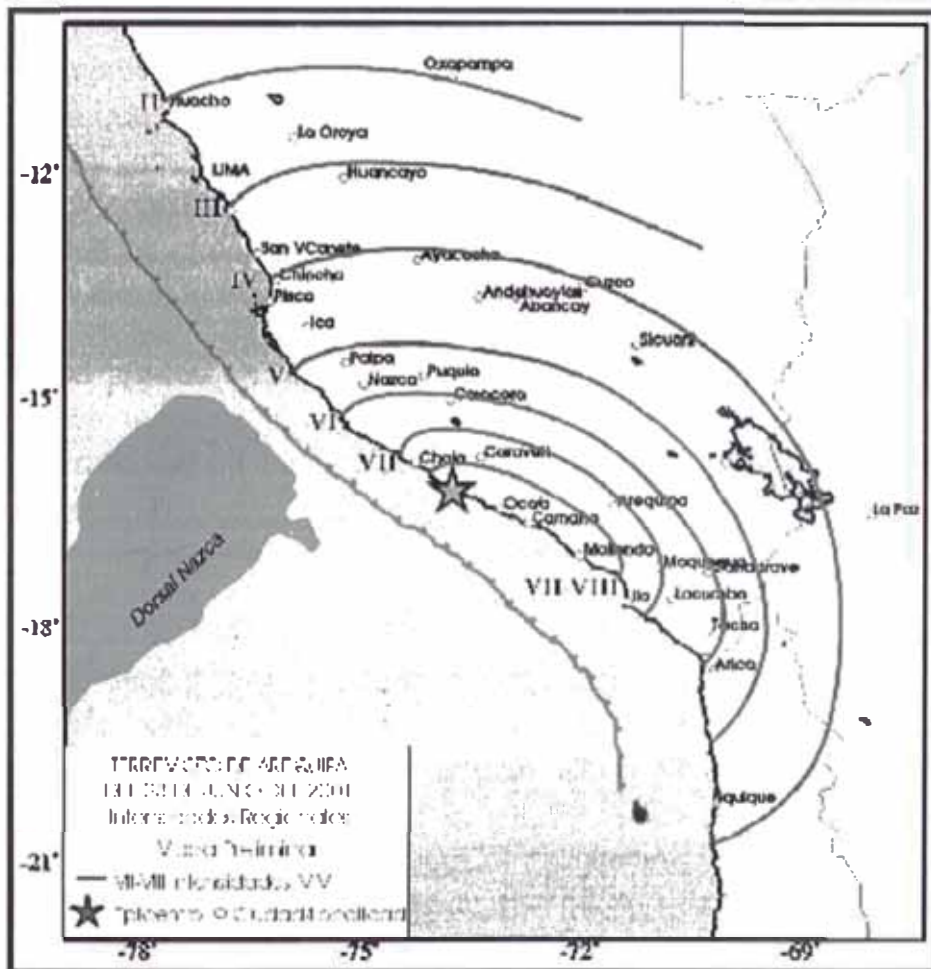


Figura 3-2: Mapa de Isosistas para el sismo del 2001 (IGP,2001)

**Los Sistemas de Fallas.** Los diferentes sistemas de fallas que se distribuyen en la zona continental se han formado como un efecto secundario de la colisión de la placa oceánica con la placa continental. Este proceso generó la presencia de plegamientos y fracturas en la corteza terrestre. Los sistemas de fallas mayormente se localizan en el altiplano y en la región subandina de Norte a Sur, así como también en los pies de las cordilleras o nevados y entre los límites de la Cordillera Occidental y la zona costera.

**La Cadena Volcánica.** La formación de la cadena volcánica se debe a la colisión entre los márgenes de las placas Sudamericana y de Nazca,

siendo el primero un margen continental y el segundo oceánico. En el Perú la cadena volcánica se localiza en la región Sur de la Cordillera Occidental, con conos volcánicos activos como los de Ampato, Coropuna, Paucarani, Misti, Ubinas, Sarasara, etc. En la región Norte y Centro de Perú hay un ausentismo de volcanes debido a que el proceso de subducción en estas regiones tiende a ser casi horizontal.

**Dorsal de Nazca.** Esta cadena montañosa o cordillera se localiza en el Océano Pacífico entre 15° S y 19° S. La estructura de la Dorsal de Nazca es producto de un proceso de distensión de la corteza oceánica y se estima que su formación tiene una edad de 5 a 10 millones de años. Esta dorsal tiene una influencia decisiva en la constitución tectónica de la parte occidental del continente, donde se nota un marcado cambio en la continuidad de otros rasgos tectónicos. En la parte oceánica, la Dorsal de Nazca divide la Fosa Oceánica en la Fosa de Lima y la Fosa de Arica.

Todos los sismos en la porción oceánica corresponden a la zona de subducción, mientras que en la porción continental se incluyen los sismos de la zona de Benioff, con profundidades focales mayores de 70 Km y los sismos continentales que son superficiales. La geometría espacial de la sismotectónica del Perú se muestra en la Figura 3-3.

Al considerar las fuentes de sismos que puedan ser significativos para la intensidad del movimiento en el área de estudio, es importante tener en cuenta las diferencias fundamentales en las características de atenuación asociadas con los sismos de subducción y los sismos superficiales. En general, los sismos superficiales se atenúan con mayor rapidez que los sismos de subducción. Consecuentemente, mientras es importante considerar las fuentes de sismos de subducción, también es necesario tomar en consideración las fuentes más cercanas de sismos continentales superficiales la zona en estudio.

### **3.2.3 Metodología y Resultados del Análisis del Peligro Sísmico**

#### **3.2.3.1 Metodología Adoptada**

El peligro sísmico se evaluó aplicando la metodología desarrollada por A. Cornell (1968), la cual fue modificada e implementada en el programa de cómputo RISK por R. McGuire (1976). El cálculo del peligro sísmico se evalúa con la finalidad de predecir probabilísticamente las posibles aceleraciones, velocidades desplazamientos que podrían ocurrir en un lugar determinado considerando los datos de sismos pasados y características tectónicas asociadas a la actividad sísmica. El



cálculo del peligro sísmico desarrollado por McGuire fue implementado en el país por Casaverde y Vargas en 1980, los cuales utilizaron el catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú IGP (1980). Mas tarde diferentes investigadores fueron actualizando dicho estudio.

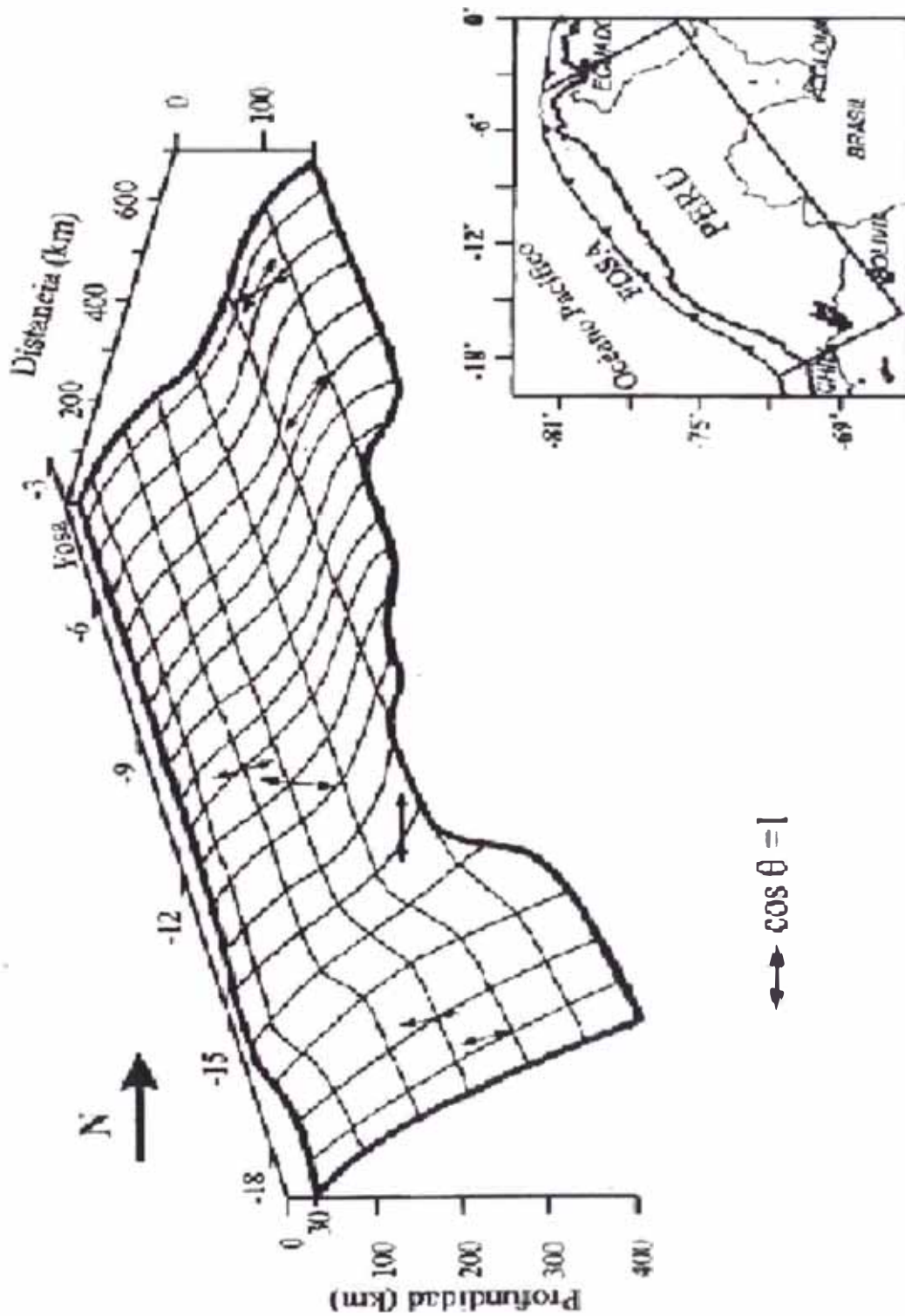


Figura 3-3 Geometría espacial de la tectónica en el Perú (Tavera, 2001)

### 3.2.3.2 Fuentes Sismogénicas

Para la evaluación del peligro sísmico en la ciudad de Moquegua se ha determinado probabilísticamente los valores de aceleraciones máximas esperadas usando las fuentes sísmicas de subducción y continentales propuestas por Castillo (1991) y los parámetros sismológicos actualizados con la base de datos del catálogo sísmico del IGP hasta el año 2001, por Aguilar (2001), los cuales se muestran en las Tablas 3-1, 3-2 y 3-3 respectivamente.

### 3.2.3.3 Leyes de Atenuación

Dos leyes de atenuación de aceleraciones fueron utilizadas, la primera propuesta por Casaverde y Vargas (1980), que ha sido empleada para las fuentes asociadas al mecanismo de subducción

$$A = 68.7 e^{0.8M_S} (R+25)^{-1.0}$$

Donde:

A = Aceleración en  $\text{cm/s}^2$

$M_S$  = Magnitud expresada en ondas de superficie

R = Distancia hipocentral en Kms.

La segunda ley de atenuación de aceleraciones utilizada es la propuesta por McGuire (1974) para la costa Oeste de los Estados Unidos y ha sido asociada a las fuentes continentales.

$$A = 472 \times 10^{0.28M_S} (R+25)^{-1.3}$$

Donde:

A = Aceleración en  $\text{cm/s}^2$

$M_S$  = Magnitud expresada en ondas de superficie

R = Distancia hipocentral en Kms.

**Tabla 3-1:** Coordenadas Geográficas de las Fuentes de Subducción Intermedias y Profundas.

<b>FUENTES</b>	<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>				
FUENTE 15	-79.80	-8.13		-77.17	-6.53
	-76.38	-14.30		-73.86	-12.46
FUENTE 16	-76.38	-14.30		-73.86	-12.46
	-73.28	-16.87		-71.21	-14.40
FUENTE 17	-73.28	-16.87		-71.21	-14.40
	-70.86	-18.80		-68.93	-15.73
	-70.38	-22.00		-67.98	-22.00
FUENTE 19	-77.17	-6.53		-75.27	-5.33
	-73.86	-12.46		-72.03	-11.13
FUENTE 20	-72.31	-6.67		-71.00	-6.33
	-71.14	-11.30		-69.69	-10.93

**Tabla 3-2:** Coordenadas Geográficas de las Fuentes de Subducción Superficial y de las Fuentes Continentales

<b>FUENTES</b>	<b>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</b>				
FUENTE 3	-81.17	-9.00		-79.27	-7.90
	-77.00	-14.80		-75.84	-13.87
FUENTE 4	-77.00	-14.80		-75.84	-13.87
	-74.16	-17.87		-73.00	-16.53
FUENTE 5	-74.16	-17.87		-73.00	-16.53
	-71.85	-19.87		-69.21	-19.00
	-71.85	-22.00		-69.21	-22.00
FUENTE 8	-75.84	-13.87		-74.76	-13.13
	-73.00	-16.53		-71.41	-14.67
FUENTE 9	-73.00	-16.53		-71.41	-14.67
	-69.71	-18.67		-68.12	-16.13
FUENTE 11	-79.10	-5.20		-75.10	-4.33
	-76.34	-10.67		-74.17	-9.33
	-74.76	-13.13		-72.48	-11.40
FUENTE 12	-74.76	-13.13		-72.48	-11.40
	-68.12	-16.13		-67.76	-13.80

**Tabla 3-3:** Parámetros Sismológicos de las Fuentes Sísmicas,  
(Aguilar, 2001)

FUENTE	M <sub>smin</sub>	M <sub>smax</sub>	TASA	BETA	PROF. (Km)
F3	3.0	8.0	7.22	1.16	30, 60
F4	3.0	8.2	3.80	1.19	40, 60
F5	3.0	8.2	4.70	1.20	60
F8	3.0	7.0	0.82	1.27	65
F9	3.0	7.5	1.07	0.88	60
F11	3.0	7.1	8.21	1.13	40, 60
F12	3.0	7.1	0.95	1.20	50
F15	3.0	7.2	1.44	0.85	100
F16	3.0	7.2	3.05	1.55	115
F17	3.0	7.5	5.61	1.21	90, 125, 160
F19	3.0	7.0	2.79	1.12	120, 160
F20	3.0	7.5	0.61	0.75	610

### 3.2.3.4 Aceleraciones Máximas Esperadas

Una malla de puntos que cubre la zona donde se ubica la ciudad de Moquegua fue evaluada. Las coordenadas de los puntos analizados y los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 3-4. La Lámina L-31 muestra la distribución de aceleraciones máximas esperadas en el área de estudio para un periodo de exposición sísmica de 50 años y la Lámina L-32 muestra las aceleraciones máximas correspondientes para 100 años de exposición sísmica. Ambos resultados tienen una probabilidad de excedencia del 10%

Se observa que para 50 años de exposición sísmica y 10% de excedencia, el valor de la aceleración máxima esperada para la ciudad de Moquegua es de 0.41g y para 100 años de exposición sísmica la aceleración máxima esperada alcanza un valor de 0.51g.

El cálculo del peligro sísmico se realiza con la finalidad de predecir probabilísticamente las posibles aceleraciones que podrían ocurrir en un lugar determinado, y dicho análisis no considera la influencia de las condiciones locales del suelo, ni

los efectos de interacción suelo – estructura, ambos aspectos serán tratados más adelante.

**Tabla 3-4:** Resultado del análisis de peligro sísmico de Moquegua (aceleraciones en  $\text{cm/s}^2$ )

Coordenadas		PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
Lat.	Long.	Punto	30	50	100	200	400	475	950
-71.10	-17.40	1	144.43	180.79	245.34	315.29	403.46	426.27	532.52
-70.85	-17.40	2	141.80	176.84	238.75	306.86	391.04	413.36	513.97
-70.60	-17.40	3	139.06	172.86	232.37	298.68	378.46	400.88	497.77
-71.10	-17.15	4	140.95	175.50	236.44	303.70	385.96	408.21	505.96
-70.85	-17.15	5	138.38	171.72	230.28	295.83	373.88	395.93	490.04
-70.60	-17.15	6	135.88	168.14	224.63	288.97	363.79	384.87	475.43
-71.10	-16.90	7	137.52	170.46	228.24	293.21	369.83	391.44	483.85
-70.85	-16.90	8	135.30	167.22	223.01	286.79	360.27	380.95	470.25
-70.60	-16.90	9	132.93	163.86	217.77	280.51	351.05	370.86	457.52

El análisis del riesgo sísmico se evaluará para tres sismos escenarios:

- Sismo de Arequipa del 23 de Junio del 2001, el cual afectó gravemente a la ciudad Moquegua, donde el valor pico de la aceleración a nivel de la superficie fue de 284 gals.
- Sismo para un tiempo de exposición de 50 años con una probabilidad de excedencia del 10% (periodo de retorno de 475 años).
- Sismo para un tiempo de exposición de 100 años con una probabilidad de excedencia del 10% (periodo de retorno de 950 años)

Los dos últimos escenarios han sido elegidos de acuerdo el criterio de Grases (1989) los cuales se muestran en la Tabla 3-5

**Tabla 3-5:** Valores representativos de criterios empleados en la selección de movimiento sísmicos de diseño (Grases, 1989)

TIPO DE OBRA	Vida Util (años)	Probabilidad de Excedencia	Periodo de Retorno (años)
Instalaciones esenciales con capacidad muy limitada para resistir deformaciones inelásticas y peligro de contaminación (contenedor de reactores nucleares)	50 a 100	0.01	> 5000
Equipos de S/E eléctricas de alto voltaje	50	0.03	1600
Puentes o viaductos de arterias principales	100	0.1	950
Tanque de almacenamiento de combustible	30	0.05	590
Edificaciones para viviendas	50	0.1-0.2	225-500
Construcciones temporales que no amenacen obras de importancia mayor	15	0.3	40

El factor de amplificación para el sismo de Arequipa se ha estimado a partir de las mediciones de microtrepidaciones realizadas durante el estudio de Microzoficación Sísmica de la Ciudad de Moquegua UNI – CONCYTEC (2002), de donde se tiene que el valor máximo de la aceleración en el basamento rocoso fue de 0.21g. La evaluación de la amplificación sísmica de la ciudad de Moquegua será analizada en la Sección 3.3.8.

La Tabla 3-6 muestra los valores de la aceleración pico para los 3 sismos escenarios.

**Tabla 3-6** Aceleración pico a nivel de basamento rocoso para los tres sismos Escenarios.

SISMO ESCENARIO	PGA
Sismo 2001	0.21g
50 años Exposición Sísmica	0.41g
100 años Exposición Sísmica	0.51g

### 3.3 Características Físicas de la Ciudad de Moquegua

El análisis de peligro involucra otras características físicas adicionales a las analizadas en el presente capítulo. Seguidamente se muestra un listado de las variables que deben ser evaluadas para un análisis integral de peligro de la ciudad de Moquegua, algunas de las cuales se han desarrollado como parte de este estudio.

#### *Geológicos*

- Geomorfológico
- Estructural
- Estratigráfico
- Hidrogeológico
- Litológico

#### *Climatológicos por Estaciones y en Temporadas de Fenómeno del Niño*

- Temperatura
- Humedad relativa
- Precipitaciones
- Vientos

#### *Ecológico*

- Flora y fauna marina.
- Cobertura Vegetal.

#### *Topográfico*

#### *Hidrográfico*

- Ríos Tumilaca, Torata y Huaracane: Características fisiográficas.

#### *Hidrológico*

- Caudales por estaciones y en temporada del Niño de los Ríos Tumilaca, Torata y Huaracane.
- Duración de la crecida.
- Sedimentación.

#### *Suelos*

- Capacidad portante.
- Nivel freático.
- Suelos especiales
- Infiltración

#### *Sismotectónico*

- Tectónica y su relación con la actividad sísmica.

#### *Sismológico*

- Sismicidad del área de estudio
- Ubicación de fuentes sismogénicas
- Isosistas de los diferentes sismos que afectaron la región.

#### *Sísmico*

- Recurrencia y probabilidad de sismos.
- Intensidades máximas de movimiento sísmico esperado.

### **3.3.1 Topografía**

La topografía de la zona donde se encuentra el área en estudio es variada debido a que la ciudad de Moquegua se sitúa al borde de la Llanura Costanera, casi en el límite del Flanco Andino. Esta zona se caracteriza por sus terrenos llanos y áridos, fuertemente disectados por quebradas.

La zona urbana de Moquegua se encuentra a una altitud promedio de 1410 m.s.n.m., en un área de pendiente relativamente alta con dirección NS. La zona central y antigua de la ciudad se encuentra circundada al norte por su valle; y por cerros en sus otros extremos, los que al poblarse han dado lugar a la formación de pueblos jóvenes donde se asientan el 48% del total de viviendas del área urbana de la ciudad de Moquegua. En la parte norte de la ciudad está ubicado el valle con pendiente hacia el Noreste. El río Moquegua, que es el que irriga el valle, se forma por la confluencia de los ríos Tumilaca y Torata. El caudal de este río es sumamente variable, durante la época de lluvias (Diciembre – Marzo), la parte alta de la zona puede descargar gran cantidad de agua; mientras que durante el estiaje está frecuentemente seco. La Lámina L-33 muestra la topografía de la zona en estudio, en la cual se indica también las áreas urbanas consideradas en el presente estudio.

### **3.3.2 Geomorfología**

El área de estudio está emplazada sobre el lecho y los flancos del valle que transcurre en dirección Noreste a Suroeste, dentro del cual se ubica la ciudad de Moquegua y las zonas agrícolas. La otra parte del territorio es árida, y está compuesta por colinas y penillanura costera, en la cual se ubican los poblados de San Antonio, Chen Chen, Samegua y Los Angeles. Todas las unidades geomorfológicas están constituidas por depósitos clásticos del terciario superior pertenecientes a la Formación Moquegua y a depósitos del cuaternario, los cuales están disectados por numerosas quebradas que confluyen en el valle de los ríos Tumilaca, Torata, Huanrancane. De Noreste a Suroeste se ubican las colinas costeras, cuyas altitudes aproximadas varían de 1,550 a 1,800 m.s.n.m., estando



conformadas por afloramientos sedimentarios de la formación Moquegua Superior (depósito grueso), como puede observarse en la Lámina L-34, de unidades geomorfológicas. Al Noreste de la zona de estudio, que no aparece en esta lámina, se ubican las colinas volcánicas, con una altitud promedio de 2,500 m.s.n.m., estando conformadas por rocas volcánicas de la formación Toquepala.

### **3.3.3 Geología Estructural**

Estructuralmente las formaciones Moquegua Superior e Inferior proceden de diferentes eventos geológicos y tectónicos. La primera se supone que es el resultado del relleno mediante fuertes corrientes de transporte y deposición de una cuenca longitudinal existente entre la Cadena Costanera y el Pie de los Andes, originando la formación de rocas conglomerádicas. La segunda es producto de la sedimentación de manera lenta de material predominantemente fino en cuencas lacustres, lo cual generó la formación de rocas lutáceas y arenosas. La estratificación de ambos tiene un suave buzamiento de 2° a 10° SO–SE y un plegamiento muy suave. Existe evidente diaclasamiento, así como fracturamiento vertical y horizontal en ambas formaciones; además existen fallamientos de aspecto local y tipo normal, observable en los taludes del canal de Pasto Grande ubicado al sur este de Chen Chen.

### **3.3.4 Geodinámica**

La actual geoforma de la zona de estudio está determinada por los eventos tectónicos sucedidos desde el terciario hasta el cuaternario y se encuentra en evolución de acuerdo al tiempo geológico, donde la formación Moquegua está siendo fuertemente erosionada y disectada por quebradas secas, con tributarios que surcan las diversas “pampas”, como las de Chen Chen, San Antonio, entre otras. Se han podido localizar evidencias de movimientos de masas en el cerro El Siglo, donde se observa escarpes casi verticales con alturas de 10 a 20 m y topografía de bastante pendiente.

Fenómenos recientes que pueden generar inestabilidad o áreas de peligro geodinámico son los deslizamientos, desprendimientos y caídas de roca del talud de la vía que comunica el cercado de Moquegua con San Antonio, tanto en el lado izquierdo como en el lado derecho. En este lugar se deslizan bloques de roca sedimentaria constituidas por areniscas lutáceas de la formación Moquegua Inferior, que aflora en la mayor parte de la localidad de San Antonio y alrededores. En esta misma zona, donde transcurre la Carretera binacional, los taludes están fuertemente agrietados en algunos sectores, por lo que se podrían delimitar como zonas de

probable deslizamiento o desprendimiento de rocas. En la quebrada “El Pedregal” o valle seco, ubicado al Noreste de la ciudad de Moquegua, existe un área longitudinal de deslizamiento pequeño de material granular, en el talud derecho aguas abajo. Así mismo, en la mayoría de las quebradas y valles secos existen evidencias de la presencia de los fenómenos dinámicos como huaycos, que son materiales arrastrados por aguas en épocas de avenidas o escorrentía pluvial. Estas evidencias se observan notoriamente en las zonas aledañas a las pampas de Chen Chen, San Antonio y otros lugares, como se muestra en la Lámina L-35, de Geología Superficial y Geomorfología Local.

### **3.3.5 Hidrogeología**

Durante el estudio de Microzonificación Geotécnica de la Ciudad de Moquegua (2002) se encontró presencia de aguas subterráneas en el área de estudio. Filtraciones de agua en la zona de Chen Chen, al lado de la planta de tratamiento de agua. El área donde se presentan estas filtraciones se utiliza como zona de cultivo. Así mismo, se ubicaron otras fuentes de agua subterránea en la localidad de San Antonio, en el Centro de Salud de San Antonio, donde se presenta una filtración de agua a una profundidad de 2.5 a 3.0m, con dirección de flujo subterráneo de Noreste a Suroeste. Este flujo podría ser originado por la infiltración y percolación de aguas pluviales desde las partes altas y estaría ocasionando problemas de expansión en rocas y suelos arcillosos de la Formación Moquegua Inferior que está ubicado debajo de suelos granulares. También existen manantiales de pequeño caudal en algunos otros lugares de esta zona. En la parte media a baja del cercado de Moquegua se ubicó aguas freáticas con dirección de flujo subterráneo hacia la zona baja del valle o lecho del río.

### **3.3.6 Comportamiento Dinámico del Terreno**

El comportamiento dinámico de los suelos de fundación de la ciudad de Moquegua fueron evaluados a través de mediciones de microtrepidaciones, durante el Estudio de Microzonificación realizada por la UNI-CONCYTEC, 2002. Estos ensayos permitieron determinar los periodos predominantes de vibración natural del terreno en todo el área de estudio, con los cuales se ha elaborado un mapa de curvas isoperiodo para la ciudad de Moquegua, el cual se muestra en la Lámina L-36. La evaluación de dicha información, conjuntamente con el análisis de los registros sísmicos obtenidos durante el terremoto del 23/06/2001, permitió definir las características dinámicas del terreno en cada una de las zonas geotécnicas, propuesta en el mencionado estudio y cuya descripción se presenta líneas abajo.

*Zona I:* Conformada principalmente por El Cercado y el CPM Los Angeles. Esta zona presenta un relleno superficial medianamente compacto, constituido por arenas y gravas limosas, que en algunas zonas alcanzan hasta los 2.0 m de profundidad. El terreno natural está conformado por gravas con matriz arenosa y limosa, de compacidad media a suelta, y en zonas por un material fuertemente cementado de alta rigidez. Los periodos predominantes obtenidos en esta zona varían desde 0.10 s hasta 0.40 s.

*Zona II:* Área destinada a la zona de expansión urbana de Chen Chen. Litológicamente está constituido por conglomerados y areniscas intercaladas con algunos estratos de areniscas tufáceas, así como tufos depositados. En esta zona geotécnica, el terreno presenta dos rangos de periodos predominantes bastante diferentes a pesar que aparentemente no existen discontinuidades geológicas que expliquen tal comportamiento dinámico. En el sector de la planta de tratamiento de agua y vecina a la quebrada los periodos predominantes varían entre 0.1 y 0.3 s, manifestando un comportamiento de suelo rígido, sin embargo, en el sector adyacente, que es el área destinada a la expansión urbana, los periodos predominantes varían de 1.0 s hasta 1.5 s mostrando amplificaciones importantes en este rango de periodos.

*Zona III:* Conformada principalmente por el CPM San Antonio, y parte del PP.JJ. El Siglo. Esta zona se ha subdividido en dos zonas en función a la profundidad en que se encuentra el estrato de suelo arcilloso, que presenta características expansivas. Los valores de periodos predominantes obtenidos en estas sub-zonas son las siguientes:

*Zona III-A:* Conformado por un material granular de compacidad media a suelta, el cual en algunas zonas se encuentra cubierto por estratos de relleno de poca potencia. Subyaciendo al material granular, a profundidades mayores a los 4.0 m en promedio, se encuentra un estrato de arcillas limosas y arenosas, de baja plasticidad. Los periodos predominantes registrados en la zona que abarca el CPM San Antonio varían de 0.55 a 0.8 s en la parte mas llana, disminuyendo hasta 0.2 s en las partes altas y en la zona de PP.JJ. Mariscal Nieto y la Quebrada del Pedregal. Los periodos obtienen valores de 0.16 s en el sector de topografía accidentada y valores de 0.40 s en la zona de la quebrada.

*Zona III-B:* El terreno de fundación está conformado por estratos de arcilla limosa y arena arcillosa, cubiertos por un material gravoso de 1.0 m de espesor en promedio. El material arcilloso tiene una consistencia rígida, bajo contenido de humedad y alto potencial de expansión. Los

periodos predominantes determinados en esta zona tienen poca variación, encontrándose en el rango de 0.20 a 0.45 seg.

*Zona IV:* Conforman el área donde se ubica el PP.JJ. San Francisco y está constituida por areniscas arcósicas, lutáceas y arcillosas de color marrón claro con estratificación casi horizontal, con una topografía bastante accidentada. Los periodos predominantes del terreno en esta zona varían de 0.2 a 0.32 s, sin embargo la conformación topográfica contribuye a la amplificación de las ondas sísmicas, generando un efecto desfavorable para las edificaciones.

### **3.3.7 Zonificación Geotécnica**

Esta zonificación agrupa áreas que de acuerdo a los distintos factores analizados, presentan un nivel de peligro sísmico tal que su efecto resultante sobre las estructuras es similar. Tanto el comportamiento estático y dinámico fueron analizados en el estudio de Microzonificación Geotécnica de la ciudad de Moquegua convenio UNI-CONCYTEC, 2002.

Como resultado de este análisis se muestra la Lámina L-37 correspondiente a la zonificación que fue propuesta en el estudio de Microzonificación, y una descripción de éstas se presenta seguidamente:

*Zona I .-* Esta zona está comprendida por la llanura costera y parte del valle del río Tumilaca, abarcando el Cercado de Moquegua, parte del Asentamiento Humano El Siglo y las urbanizaciones que se encuentran en los alrededores. Geológicamente, la parte alta de esta zona está constituida por areniscas arcósicas y lutáceas, y arcillas de color marrón claro con estratigrafías casi horizontales y continuas pertenecientes a la formación Moquegua Inferior y la parte baja, que está enclavada en el valle del río Tumilaca, es de origen fluvio-aluvial. Esta zona abarca también la parte baja de la ciudad, aledaña al río y la terraza del aeropuerto, así como el Centro Poblado Menor de los Angeles. El material de fundación donde se desplanta las estructuras existentes, presenta un relleno superficial medianamente compacto, constituido por arenas y gravas limosas, que en algunas zonas alcanzan hasta los 2.0 m de profundidad. Subyaciendo a éste se encuentra el terreno natural que está conformado por gravas con matriz arenosa y limosa, de compacidad media a suelta, y en zonas por un material fuertemente cementado de alta rigidez.

La capacidad de carga admisible para una cimentación típica convencional en esta zona varía de 1.2 a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, para profundidades de cimentación de 1.00 a 1.20 m. Los periodos predominantes obtenidos para esta zona varían desde 0.10 s hasta 0.40 s, con factores de amplificación importantes

hasta un rango de periodos de 0.80 s. En consecuencia, para esta zona se recomienda usar los parámetros de diseño sismo-resistente correspondientes a un Suelo Tipo S2 del Reglamento Nacional de Construcciones.

Esta zona está conformada en su mayor parte por el área consolidada de la ciudad, y en menor proporción por un área de expansión, por lo cual, las estructuras mas vulnerables lo constituyen las edificaciones antiguas.

*Zona II* .- Es el área de mayor interés para el presente estudio, por lo que abarca la nueva zona de expansión urbana destinada para la reubicación a los damnificados del sismo del 23 de Junio del 2001. Litológicamente está constituido por material de deposición formado por conglomerados y areniscas intercalados con algunos estratos de areniscas tufáceas así como tufos depositados de la formación Moquegua Superior. Su topografía presenta suaves pendientes de 3° a 7°, conformada por estratos de gravas con matriz limosa y arenosa, de compacidad suelta a media. Para fines de cimentación de viviendas de interés social, la capacidad de carga admisible a la profundidad de cimentación de 1.00 m, sobre el terreno natural, varía de 1.2 a 1.7 Kg/cm<sup>2</sup>.

En esta zona geotécnica, el terreno presenta dos rangos de periodos predominantes bastante diferentes a pesar que aparentemente no existen discontinuidades geológicas que expliquen tal comportamiento dinámico. En el sector de la planta de tratamiento de agua y vecina a la quebrada del Pedregal, los periodos predominantes varían entre 0.1 y 0.3 s, manifestando un comportamiento de suelo rígido, sin embargo, en el sector adyacente, que es el área destinada a la expansión urbana, los periodos predominantes varían de 1.0 hasta 1.5 s mostrando amplificaciones importantes en este rango de periodos. Debido a que la mayor extensión del terreno destinada para la expansión urbana se encuentra en la zona de periodos predominantes mayores que 1.0 s, para el diseño sismo-resistente de esta zona se recomienda considerar los parámetros correspondientes al Suelo Tipo S3 del RNC.

*Zona III* .- Conformada principalmente por el CPM San Antonio, parte de los Asentamientos Humanos El Siglo y Mariscal Nieto así como parte de la Quebrada del Pedregal. Para poder diferenciar mejor los dos tipos de comportamiento del suelo, se a dividido esta zona en dos subzonas, denominadas Zona III A y B

*Zona III A* .- Conformada por parte de la zona llana del área central del CPM San Antonio, así como por la zona mas elevada del cerro El Siglo y los

asentamientos humanos El siglo y Mariscal Nieto, terminando en la Quebrada del Pedregal. El terreno de fundación está conformado por un material granular de compacidad media a suelta, el cual en algunas zonas se encuentra cubierto por estratos de relleno de poca potencia. Subyaciendo al material granular, a profundidades mayores a los 4.0 m en promedio, se encuentra un estrato de arcillas limosas y arenosas. La capacidad de carga admisible para edificaciones de interés social varía de 1.0 a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> a una profundidad de cimentación de 1.00 m. Los periodos predominantes registrados en la zona que abarca el CPM San Antonio varían de 0.5 a 0.8 s en la parte mas llana, disminuyendo hasta 0.2 s en las partes altas. En la zona de AA.HH Mariscal Nieto y la Quebrada del Pedregal los periodos predominantes varían desde 0.16 s en el sector de topografía accidentada hasta 0.40 s en la zona baja de la quebrada. Los parámetros de diseño sismo-resistente recomendados para esta zona corresponden al Suelo Tipo S3 del RNC. Para efecto de diseño de cimentaciones en estos tipos de suelos se debe considerar la posibilidad de asentamientos diferenciales por un leve potencial de colapso del material granular cementado, así como pequeños levantamientos por expansión de las arcillas limosas. de baja plasticidad.

*Zona III B .-* Esta zona abarca las dos partes laterales del CPM San Antonio, donde existen afloramientos de la Formación Moquegua Inferior, conformado por depósitos de areniscas arcólicas lutáceas y arcillosos de color marrón claro, con estratificación casi horizontal y continua. El terreno de fundación está conformado por estratos de arcilla limosa y arena arcillosa, cubiertos por un material gravoso de 1.0 m de espesor en promedio. El material arcilloso tiene una consistencia rígida, bajo contenido de humedad y alto potencial de expansión (hasta 18% de expansión con cargas de expansión de 4.6 Kg/cm<sup>2</sup> ), por lo que se debe considerar su efecto en las cimentaciones para evitar el agrietamiento de las edificaciones. La capacidad de carga admisible del terreno en condiciones saturadas varía de 0.8 a 1.0 Kg/cm<sup>2</sup> para edificaciones de interés social, con profundidades de cimentación de 1.0 m.

Los periodos predominantes determinados en esta zona tienen poca variación, encontrándose en el rango de 0.20 a 0.40 s. Sin embargo, en este sector también se han observado grandes amplificaciones sísmicas (Lermo, 2002), por lo que su comportamiento dinámico debe ser caracterizado como el de un Suelo Tipo S2 del RNC.

*Zona IV .-* Esta zona está conformada básicamente por el CPM San Francisco, ubicado sobre las laderas del cerro que se encuentra al Este de El Cercado de Moquegua. El terreno de fundación está constituido

superficialmente por rellenos y gravas de color beige pertenecientes a la formación Moquegua Superior, compuesta por gravas angulosas, arenas medias a finas y limos inorgánicos, de compacidad suelta con potencias mayores a los 4.00 m explorados. Subyaciendo a este material se encuentran areniscas arcóscicas, lutáceas y arcillosos de color marrón claro, rígida, con estratificación casi horizontal. La topografía de esta zona es bastante accidentada presentando pendientes mayores a los 70°, lo cual es un elemento desfavorable para su uso como área urbana. La capacidad de carga admisible para viviendas de interés social varía de 0.6 a 0.8 Kg/cm<sup>2</sup> en terreno saturado.

Los periodos predominantes del terreno en esta zona varían de 0.2 a 0.35 s, sin embargo esta zona es propensa a sufrir grandes amplificaciones sísmicas por efectos topográficos y posibles problemas de inestabilidad de taludes. En consecuencia, esta zona presenta las condiciones mas desfavorables para ser utilizada como área urbana. En caso de proyectarse la construcción de edificaciones en esta zona, para el diseño sismo-resistente se deberá considerar el comportamiento dinámico del terreno similar al de un Suelo Tipo S3 del RNC.

### **3.3.8 Amplificación Sísmica**

La amplificación sísmica es el efecto de sitio de mayor importancia durante la ocurrencia de un terremoto. La ciudad de Moquegua tiene dos tipos de amplificación sísmica: La amplificación debido a la estructura del suelo en casi toda la ciudad y la amplificación debido a la topografía en las zonas del PP.JJ. San Francisco y la parte alta del PP.JJ. Mariscal Nieto.

Tanto la amplificación por la estructura del suelo como la amplificación por topografía son los efectos de sitio más difíciles de modelar, siendo esta última la menos tratada dentro de la literatura especializada. El presente estudio solo analizará la amplificación debido a la estructura del suelo.

Para investigar los efectos de la estructura del suelo existen dos métodos importantes:

1. Método analítico: Análisis numérico de la amplificación, con base en los parámetros físicos del suelo (espesores y velocidades de propagación de ondas en los estratos).
2. Métodos empíricos:
  - Método de referencia: Comparación de los registros instrumentales de sismos, tomados en el sitio de interés, con un sitio de referencia ubicado en roca

- Método *de* Nakamura: Estimación de la amplificación del ruido sísmico en el sitio
- Análisis de los datos macrosísmicos sobre la afectación del sitio por terremotos anteriores.

Entre los principales trabajos desarrollados referentes al tema se podría mencionar el de Lermo et al. (2002), quien utilizó el método de la estación de referencia y el método de Nakamura para evaluar los efectos de sitio y daños en edificaciones en algunos puntos de la ciudad de Moquegua.

El método analítico es muy complejo y difícil de modelar dentro de un SIG. Sin embargo, los métodos empíricos son más adecuados tanto para modelar dentro de un entorno SIG como para aprovechar la información disponible en el proyecto.

Con el objeto de modelar la amplificación sísmica teniendo como información disponible la medición microtrepidaciones dentro del entorno SIG se utilizó el método de Nakamura. Esta información permite obtener los periodos de vibración natural del terreno, así como también, mediante las relaciones espectrales  $H/V$ , estimar la respuesta del perfil del suelo, conocida también como función de transferencia, a partir de la cual se puede estimar el valor de amplificación sísmica correspondiente.

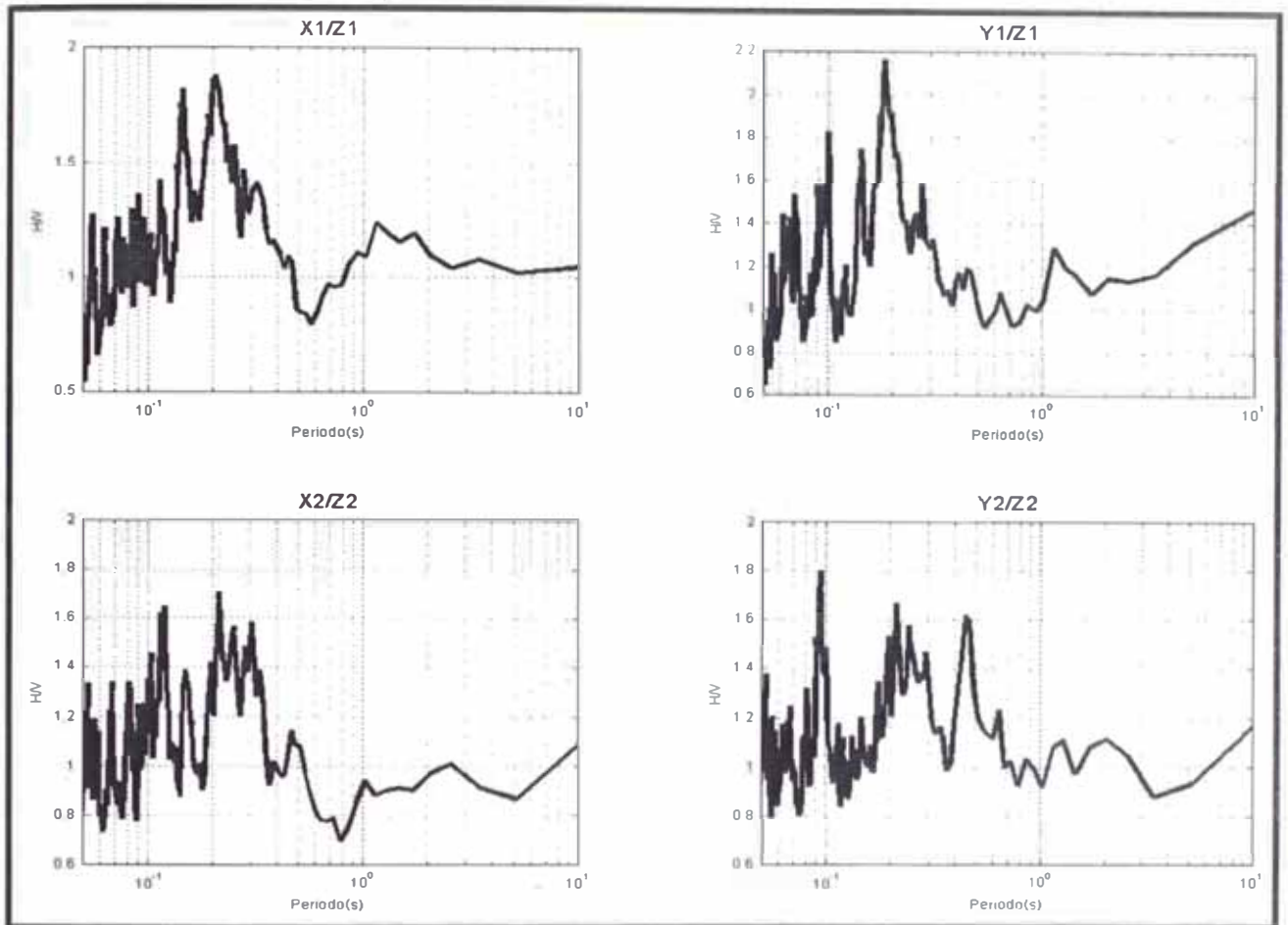
Como se puede ver en la Figura 3-4, la relación  $X/Z$  y  $Y/Z$  para un mismo punto de medición no son exactamente iguales, por lo cual se deberá realizar una correlación de esta información con los datos geotécnicos para finalmente obtener valores de amplificación sísmica para cada una de las zonas propuestas. De esta forma se estaría en la posibilidad de generar “buffers” o zonas de igual amplificación sísmica a través del uso de herramientas SIG.

Durante el análisis de amplificación del suelo en Moquegua, se pudo determinar que los periodos predominantes están en un rango que va desde 0.10 a 1.50s. La Tabla 3-7 muestra las variaciones de los periodos y amplificaciones estimadas en la Ciudad de Moquegua.

De acuerdo a estos resultados los suelos pueden ser clasificados en dos tipos: los suelos cuyos periodos son menores o iguales que 0.4s, a los que desde ahora los llamaremos suelos con periodos cortos y aquellos cuyos periodos predominantes varían desde 0.4s–1.5s y que serán denominados como suelos con periodos intermedios. La Lámina L-38 muestra los factores de amplificación sísmica del suelo para periodos cortos a partir de los ensayos de microtrepidaciones. Los rangos propuestos para periodos cortos e intermedios fueron adecuados a la norma de diseño sismo resistente E-



030 y a las clasificaciones propuestas por otros autores (Blume et. al. 1978, Everden y Thomson 1982).



**Figura 3-4:** Relación H/V para un punto evaluado en el Cercado de Moquegua.

**Tabla 3-7:** Períodos predominantes y amplificaciones del suelo para las diversas zonas de Moquegua

ZONA	RANGOS		
	Periodos predominantes	Amplificación para periodos cortos	Amplificación para periodos Intermedios
SAN ANTONIO	0.20-0.80	1.2-2.5	1.0-4.0
CERCADO	0.10-0.50	1.0-2.6	1.0-3.0
LOS ANGELES	0.15-0.25	1.5-2.0	1.2-1.5
CHEN CHEN	0.12-1.50	1.2-2.5	1.2-10.0

Lo cierto es que el método de Nakamura no necesariamente ofrece valores de amplificación sísmica adecuados para movimientos sísmicos fuertes, pues las vibraciones ambientales no reflejan el comportamiento no lineal del terreno. En consecuencia, los resultados se tienen que entender en su tendencia, y no se deben tomar los valores como absolutos, por lo que se hace necesario la correlación con los datos geotécnicos.

Con los factores obtenidos a partir de las microtrepidaciones y de acuerdo al mapa de zonificación geotécnica elaborado durante el Estudio de Microzonificación, convenio UNI-CONCYTEC (2002), se generó la Lámina L-39, la cual muestra los factores de amplificación sísmica para la ciudad de Moquegua. Como se mencionó al inicio de esta sección los factores topográficos no son analizados en este estudio, sin embargo la delimitación de las zonas, propuesta en el estudio de zonificación, incluye además de las características geotécnicas factores topográficos, por lo que la Lámina de Amplificación Sísmica (L-39) muestra la influencia de las características topográficas.

En dicho mapa se puede observar que tanto la Zona I y III-B tienen factores de amplificación entre 1.2 y 1.6, siendo estos los más bajos entre todas las zonas. Seguidamente observamos que las zonas II y III-A tienen factores de amplificación entre 1.6 y 2.2, y finalmente la zona IV con los factores más altos entre 2.2 y 2.6.

Los tipos de edificaciones existentes en Moquegua, tales como: las construcciones de adobe y quincha de 1 y 2 pisos, los de mampostería de ladrillo o bloques de concreto de 1 a 5 pisos y pórticos de concreto armado de hasta 5 pisos, son estructuras con periodos naturales cortos (0.04s – 0.4s) como se puede observar en la Tabla 3-8, por lo que, para modelar los sismos escenarios ya mencionados solo se usaron los valores de amplificación para este rango de periodos.

En ciudades donde existe tanto crecimiento vertical como crecimiento horizontal como es el caso de Lima habría que generar dos modelos para cada sismo escenario: la primera para evaluar edificaciones típicas como las de Moquegua, y la segunda para evaluar edificaciones altas (edificios de más de 8 pisos) ó estructuras especiales. Cabe aclarar que esto último sólo se realizaría siempre y cuando el suelo de la zona en estudio presente grandes amplificaciones para periodos intermedios o largos, lo cual es típico en suelos blandos ó donde el basamento rocoso está a una profundidad considerable. Un claro ejemplo de esto es lo ocurrido durante el sismo de la Ciudad de México (1985), donde los mayores daños fueron causados principalmente por amplificaciones sísmicas debido a suelos blandos. Es

importante mencionar que las zonas de San Antonio y Chen Chen, presentan grandes amplificaciones para periodos intermedios (hasta 4 para San Antonio y hasta 10 para Chen Chen), por lo que sus efectos deben considerarse adecuadamente cuando se realicen construcciones flexibles en el futuro.

**Tabla 3-8:** Periodos naturales para diferentes tipos de estructuras (periodos cortos e intermedios) calculados de acuerdo a la norma sismorresistente E-030.

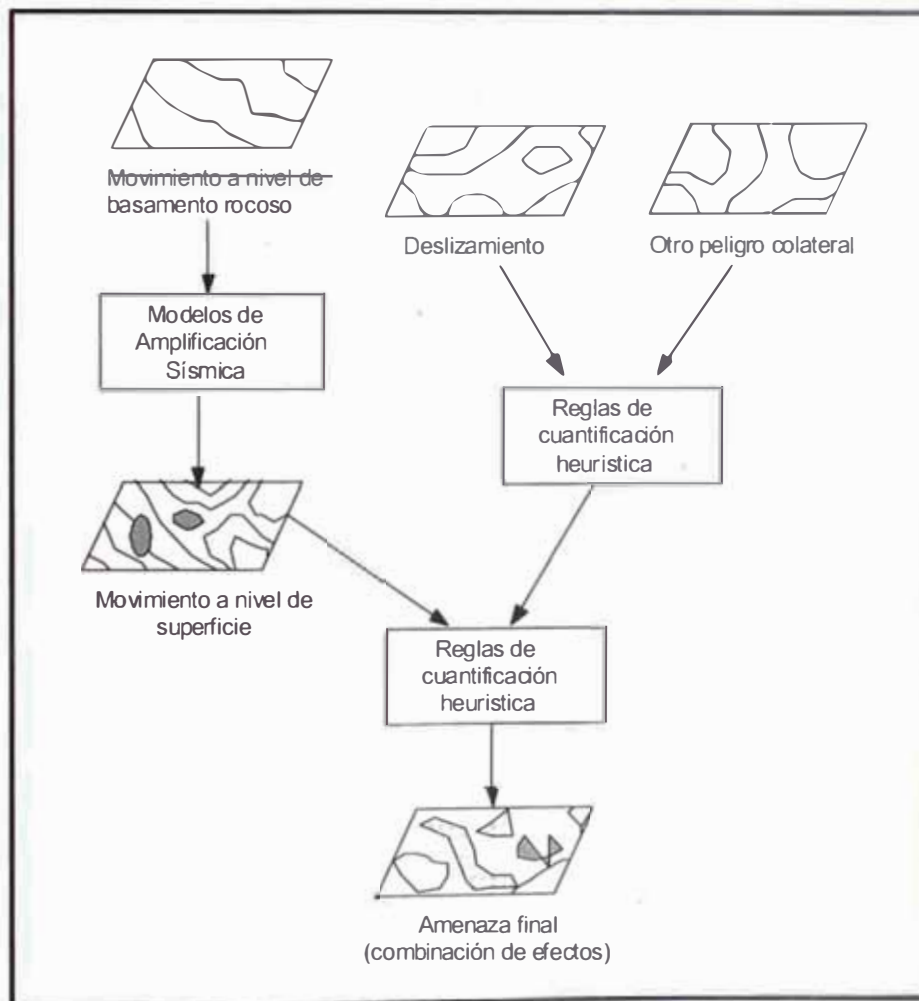
<b>TIPO DE EDIFICACIONES</b>	<b>CT</b>	<b>NPISOS</b>	<b>T=H/CT</b>
Mampostería	60	1	0.04
Pórticos de concreto + muros	45	1	0.05
Pórticos de concreto	35	1	0.07
Mampostería	60	2	0.08
Pórticos de concreto + muros	45	2	0.11
Pórticos de concreto	35	2	0.14
Mampostería	60	3	0.12
Pórticos de concreto + muros	45	3	0.16
Pórticos de concreto	35	3	0.21
Mampostería	60	4	0.16
Pórticos de concreto + muros	45	4	0.21
Pórticos de concreto	35	4	0.27
Mampostería	60	5	0.20
Pórticos de concreto + muros	45	5	0.27
Pórticos de concreto	35	5	0.34
Mampostería	60	6	0.24
Pórticos de concreto + muros	45	6	0.32
Pórticos de concreto	35	6	0.41
Pórticos de concreto + muros	45	8	0.43
Pórticos de concreto	35	8	0.55
Pórticos de concreto + muros	45	10	0.53
Pórticos de concreto	35	10	0.69
Pórticos de concreto + muros	45	15	0.80
Pórticos de concreto	35	15	1.03
Pórticos de concreto + muros	45	20	1.07
Pórticos de concreto	35	20	1.37

### 3.4 Integración de los Fenómenos Geodinámicos Dentro del Entorno SIG

Como se mencionó líneas arriba, los fenómenos geodinámicos analizados en el presente estudio son los relacionados a los sismos y sus efectos colaterales.

Uno de los mayores objetivos de este trabajo es la aplicación de la metodología propuesta en el ATC-36 (1994), el cual integra el peligro sísmico con los efectos de sitio (amplificación sísmica) en el entorno de sistemas de información geográfica (SIG). La metodología para la integración del peligro presentado en la Figura 3-5 intenta ser general, tanto que permita la aplicación de modelos más o menos sofisticados dependiendo de la disponibilidad de la información y el nivel de análisis requerido.

El uso de los sistemas de información geográfica en el análisis de la amenaza sísmica regional permite que estos mapas sean fácilmente mejorados y actualizados tan pronto como exista disponibilidad de información adicional.



**Figura 3-5:** Integración de los fenómenos geodinámicos en el entorno SIG. (ATC-36,1994)

El movimiento a nivel de basamento rocoso fue analizado en el acápite 3.2 y la amplificación sísmica fue tratada en el acápite precedente, con lo cual se puede generar el mapa de amenaza final superponiendo ambos mapas, para cada sismo escenario.

No obstante, las evaluaciones realizadas después del sismo del 23/06/01 por diferentes instituciones, sirvieron para tener una idea real del nivel de peligro al que fue sometido la Ciudad. Los siguientes párrafos describen algunas de las conclusiones a las que llegaron estas evaluaciones.

En la evaluación de distribución de intensidades realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP, 2001) establece que en los PP.JJ. El Siglo y San Francisco, y en el *Programa Municipal de Pampas de San Antonio* se registraron los valores más altos de intensidades (6<sup>+</sup> MSK). Concluyendo que la Ciudad de Moquegua habría soportado a una intensidad VII MM.

La evaluación de efectos de sitio realizada por Lermo et al. (2002) concluye en que: los PP.JJ. San Francisco, El Siglo, Mariscal Nieto y Cercado presentan amplificaciones muy parecidas; y además que la zona de *Pampas de San Antonio* muestra la mayor amplificación.

El mapa de amenaza sísmica, obtenido en base a la integración de los fenómenos geodinámicos, no sería de mucha utilidad en el análisis del riesgo sísmico si éste quedaría expresada en términos de la aceleración máxima del terreno (g, gals ó cm/s<sup>2</sup>). En un análisis de riesgo sísmico el mapa de amenaza sísmica debe estar expresada en términos de intensidad sísmica, por lo que se hace necesario el uso de alguna función que relacione la aceleración máxima del terreno con la intensidad.

#### *Relación Entre Intensidad y Aceleración*

La forma de la ecuación que permite el paso de intensidades a aceleraciones es la indicada en la ecuación (1.4).

$$\log A = \sigma I_{MM} + \gamma \quad (1.4)$$

Algunos valores de  $\sigma$  y  $\gamma$  se indican en la Tabla 3-9, los cuales han sido obtenidos de estudios de aproximación lineal con los datos de Intensidades y aceleraciones máximas del suelo.

Evidentemente, la relación entre la  $I_{MM}$  y la Aceleración máxima del suelo es más compleja. Pero las relaciones indicadas en la Tabla 3-9 han sido usadas en la determinación de leyes de atenuación para la aceleración máxima del suelo en diferentes lugares del continente americano. Trifunac (1975),

Murphy(1977) y Lomnitz (1974) son relaciones obtenidas en los Estados Unidos. La relación de Saragoni (1982) fue obtenida para regiones al sur del continente sudamericano, específicamente entre Chile, Argentina y Perú.

**Tabla 3-9:** Valores de  $\sigma$  y  $\gamma$

AUTOR	$\sigma$	$\gamma$
Trifunac y Brady	0.3	-0.014
Bolt	0.313	0.34
Murphy, O' Brien	0.25	0.25
Lomnitz	0.333	-0.5
Saragoni	0.345	-0.222

Teniendo como dato la aceleración máxima registrada durante el sismo del 23/06/2001(0.29g) a nivel de superficie, se estimo la posible intensidad a la que fue sometido la ciudad de Moquegua, basado en las relaciones mencionadas anteriormente, tal como se muestra en la Tabla 3-10.

**Tabla 3-10:** Intensidad estimada según diferentes relaciones, teniendo la aceleración máxima registrada en la ciudad de Moquegua durante el sismo del 23/06/2001 como dato de entrada

RELACION	INTENSIDAD
TRIFUNAC	8.1
BOLT	8.9
MURPHY	8.8
LOMNITZ	8.8
SARAGONI	7.7

De acuerdo a los resultados obtenidos la relación de Saragoni, es la más aproximada a la realidad pues las otras relaciones dan una intensidad mucho mayor que la observada durante el sismo del 2001. Así la Lámina L-310 muestra las amenazas finales para cada sismo escenario.

En la Lámina L-310 se puede observar que el sismo del 23/06/2001 alcanzó una intensidad de VIII MM en la ciudad de Moquegua. Esta intensidad viene a ser un poco más alta que la obtenida por el IGP (2001). Sin embargo la relación de Saragoni fue usada para estimar la intensidad sísmica de los otros dos sismos escenarios, principalmente porque no se encontró otras relaciones que pudieran aproximarse más a la realidad. Además durante el análisis de la evaluación de daños, el cual es explicado en la sección 4.4.4., también se determina que la intensidad durante el sismo del 23/06/2001 en la ciudad de

Moquegua fue de VIII MM, obtenido por comparar la matriz de daños de Moquegua con la de otras regiones (Utah, Costa Rica, Antofagasta).

Así pues, se estima que la intensidad para un sismo con un periodo de retorno de 475 años sería de IX MM en toda la ciudad de Moquegua. Asimismo se espera una intensidad de X MM para la zona de San Francisco y de IX MM para el resto de la ciudad de Moquegua dado un sismo cuyo periodo de retorno es de 950 años.

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO DE LA CIUDAD DE MOQUEGUA

#### 4.1 Introducción

Debido al crecimiento y a la densificación de la población en centros urbanos y al desarrollo de industrias que por su actividad presentan alto peligro en áreas donde pueden ocurrir fuertes terremotos, la ingeniería sísmica mundial ha tenido que explorar metodologías, técnicas y estrategias con el fin de mitigar o reducir el nivel de riesgo sísmico. Este término puede entenderse como las consecuencias sociales y económicas potenciales que podrían sufrir uno o varios de los elementos que componen el contexto social y material, tales como las personas, las edificaciones, la infraestructura de servicios públicos, las industrias y el comercio, entre otros.

El riesgo se obtiene de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Desde el punto de vista físico, el "Riesgo Específico" es la pérdida esperada en un periodo de tiempo, que puede ser expresada como una proporción del valor o costo de reemplazo de los elementos bajo riesgo. Usualmente, el riesgo específico representa pérdida de vidas, heridos y pérdidas de inversiones de capital.

La amenaza es un fenómeno físico que por sí mismo no es causa de catástrofe sino que originará el desastre en la medida en que las poblaciones afectadas por él sean vulnerables. El desastre se desencadena por factores de orden político, social, económico y ambiental que se combinan y minan la capacidad de una sociedad y sus ecosistemas para soportar tensiones. No todo acontecimiento físico se convierte en desastre sino cuando el evento supera la capacidad de la sociedad de hacerle frente.

Sin embargo, conviene distinguir entre la catástrofe y el desastre. Los dos conceptos se distinguen por la cantidad, la calidad, el grado y la especie de los daños, tal como lo expresa Quarantelli (1987, 1994); quien establece la diferencia entre los accidentes diarios, los desastres y las catástrofes. Las emergencias diarias no pueden considerarse como desastres y la sociedad las absorbe con los medios de que dispone: régimen hospitalario, bomberos, policía, etc. En el caso de los desastres y



las catástrofes, la cantidad de personas que se ven afectadas, el espacio físico, los ecosistemas, sufren graves daños. Por esa razón, quienes sobreviven quedan en situación vulnerable y hay una limitación a su libertad de acción y a su autonomía porque requieren de los otros y de la ayuda externa para salir de la situación de crisis. El problema es que muchas veces esa ayuda externa se convierte en una nueva vulnerabilidad al impedirles que se conviertan en sujetos de su propia reconstrucción.

### *La catástrofe*

La catástrofe se puede definir como un fenómeno social que altera de manera transitoria o permanente grandes conglomerados humanos y que produce múltiples víctimas humanas, daños irreparables a los ecosistemas, rompimiento de las organizaciones e instituciones y pérdidas enormes de bienes y servicios.

La catástrofe natural o antrópica es el resultado de la ruptura entre una población y su entorno físico y social, ruptura causada por razones ambientales, culturales (representaciones sociales que la gente se hace sobre su relación con la naturaleza), económicas (migraciones hacia lugares de alto riesgo) y políticas (toma de decisiones de quienes ejercen el poder nacional, regional o local). En las diversas etapas que se dan en la catástrofe, quedan al descubierto las vulnerabilidades de la sociedad antes de que ésta suceda.

### *La prevención*

Es la etapa clave en la cual las instituciones sociales correspondientes al aparato científico así como las entidades gubernamentales, tienen un papel preponderante. Unas veces se presentan deficiencias derivadas del alejamiento entre estas dos instituciones o del predominio de decisiones políticas sobre las de tipo científico. Otras, porque según sea el desarrollo socioeconómico de una sociedad particular, los avances científicos y tecnológicos presentan rezagos o porque el tipo de autoridad está en contradicción con las exigencias y/o necesidades de la misma sociedad.



## *La Emergencia*

La emergencia es el momento en que el fenómeno del desastre se manifiesta con toda claridad e intensidad. Por naturaleza es crítico. En la emergencia se pueden observar los rasgos del fenómeno, las condiciones de vulnerabilidad de la sociedad, la eficacia de las medidas preventivas, si las hay, la capacidad de recuperación de la población afectada, las medidas de autoridad al respecto y la certidumbre o no del conocimiento científico o técnico (Macías, 1992). La emergencia está relacionada con las medidas de evacuación antes del desastre, pero también con la fase del rescate y la reubicación de los damnificados en albergues y campamentos provisionales.

## *Reconstrucción*

La catástrofe implica una reconstrucción. Por experiencia se sabe que de todas las etapas del desastre, la reconstrucción es probablemente la más larga, la más costosa y la más compleja desde el punto de vista de los problemas encontrados. Por muchos aspectos, la reconstrucción se ha conceptualizado como el reemplazo de lo que se perdió, o la restauración del sistema original en su sitio, a pesar de problemas endémicos y de vulnerabilidades. Sin embargo, para muchos de los que intervienen en los procesos de reconstrucción, los desastres se presentan como oportunidades para atender problemas materiales a largo plazo en alojamiento e infraestructura, fusionando la reconstrucción con un proceso de desarrollo con las metas de reducir la vulnerabilidad y mejorar las capacidades sociales y económicas.

## *Vulnerabilidad*

La definición que se presenta a continuación no corresponde a la clásica de vulnerabilidad física de una estructura o sistema sino que tiene en cuenta el componente humano.

La vulnerabilidad en sí misma constituye un sistema dinámico, es decir, que surge como consecuencia de la interacción de una serie de factores y características internas y externas que convergen en una comunidad particular. Es a esa interacción de factores a la que se le denomina vulnerabilidad global (Wilches, 1992).

En los países del tercer mundo, la migración del campo a la ciudad, la densidad poblacional de las grandes ciudades, la explotación indebida de los recursos naturales, el tipo de construcción, los elevados niveles de contaminación ambiental y el difícil acceso al mercado de la tierra, se convierten en factores de aumento de las vulnerabilidades y, por lo tanto, de mayor riesgo.

*Aspecto Social del Riesgo:* para Chardon (1994), lo constituyen los elementos expuestos al fenómeno físico, como son la población, el patrimonio cultural, las construcciones, las obras de infraestructura y demás elementos naturales.

*Vulnerabilidad diferencial:* se habla de ella para referirse a que son los pobres los más expuestos frente a los fenómenos físicos por su localización generalmente los terrenos más desfavorables y expuestos a mayores niveles de peligro.

Wilches(1989) distingue varios tipos de vulnerabilidad:

*Vulnerabilidad Cultural:* se puede definir como todo aquello que la comunidad ha aportado para la configuración de su universo vital incluyendo la acumulación simbólica que constituye el patrimonio cultural.

*Vulnerabilidad Política:* hacen referencia a la manera como funciona el poder político a nivel nacional, regional y local y al grado de participación que tiene y ejerce la sociedad civil: en la sociedad peruana existe una notoria precariedad y debilidad tanto del Estado como de la sociedad civil organizada.

*Vulnerabilidad Física:* la ubicación espacial de las poblaciones en territorios de alta vulnerabilidad a amenazas físicas tales como erupciones de volcanes, sismos, maremotos, etc., se torna en vulnerable cuando se invaden los territorios que son propios de la naturaleza y al mismo tiempo se desconocen estos fenómenos.

*Vulnerabilidad Socio-económica:* el nivel de traumatismo que resulta de una catástrofe, es inversamente proporcional al nivel de la organización existente en una comunidad. Las sociedades que tienen una red compleja de organizaciones formales e informales, son capaces de absorber más fácilmente las consecuencias de un desastre que aquellas que no la tienen.

Los diferentes tipos de vulnerabilidad aquí descritos son evaluados en investigaciones cuyo objetivo es la estimación holística del riesgo sísmico. La presente investigación no contempla este tipo de evaluación, sino más bien esta enmarcada dentro del paradigma del riesgo en la ingeniería sísmica, sin embargo no podemos dejar de mencionar estos enfoques para darnos cuenta de la amplitud del tema.

Los siguientes acápite explicarán: la metodología para evaluar el riesgo sísmico usando sistemas de información geográfica (SIG), las ventajas y limitaciones del método. También se hará una revisión de los aspectos socio-económicos de la ciudad de Moquegua. Seguidamente se analizará la vulnerabilidad física de las edificaciones existentes en la ciudad de Moquegua, para finalmente analizar el riesgo sísmico, estimando tanto pérdidas económicas directas como número el número de víctimas para sismos escenarios.

## **4.2 Metodología**

El método adoptado para el análisis del riesgo sísmico esta basada principalmente en la metodología planteada por el ATC-36 (1994), el cual está enmarcado dentro de los métodos de evaluación de riesgo sísmico para daños inducidos por sismos escenarios. En la Figura 4-1 se muestra un esquema de la metodología adoptada.

### **4.2.1 Ventajas**

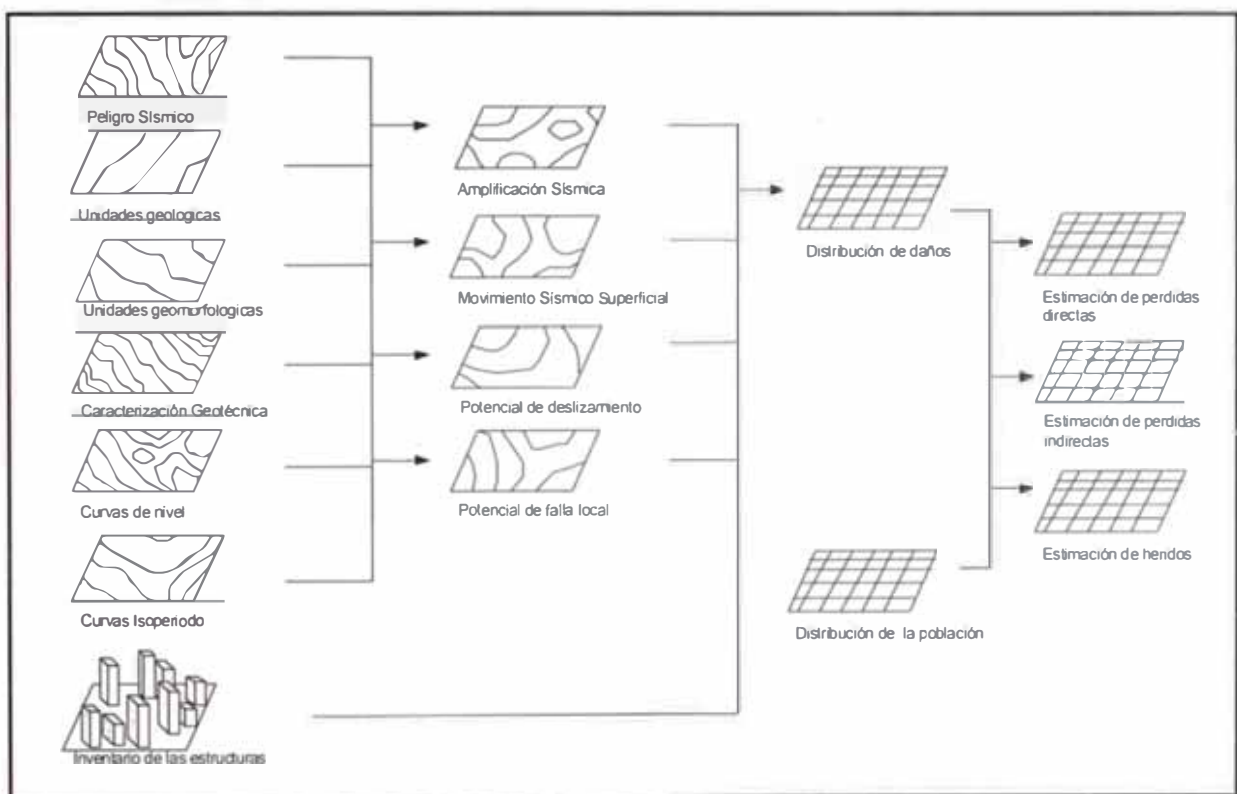
La principal ventaja de este método es que se puede aplicar a cualquier Región (Distrito, Provincia, Ciudad Capital) que tenga un catastro actualizado y sistematizado, lo cual no hace necesario un gran despliegue de brigadistas, debido a que la principal fuente de información son los archivos digitales del catastro. A manera de comentario se sabe que las principales ciudades del Perú tienen este tipo de información ó están en proceso de sistematización.

Por otra parte, la base gráfica georeferenciada necesaria para dicha evaluación, ha sido elaborada y actualizada por COFOPRI en la mayoría de las ciudades, en algunas de las cuales también ha sido desarrollada por los mismos gobiernos locales.

Debido al uso de Sistemas de Información Geográfica los mapas resultantes son fáciles de comprender como también consultar, lo cual permite planificar y seguir lineamientos de mitigación de desastres. En consecuencia, esta es una información muy

importante para las autoridades locales e instituciones relacionadas con el programa de prevención de desastres.

Esta base de datos espacial es fácilmente actualizable, amoldándose así a la dinámica de la ciudad. Además, sirve como base para la realización de otros estudios cuyos enfoques de riesgo son más detallados, pues como se sabe la gestión del riesgo sísmico es muy amplio, estando involucradas también otras variables como por ejemplo las sociales, económicas y culturales, además de las usadas en esta metodología



**Figura 4-1** Esquema de la metodología usada para el análisis de riesgo sísmico

#### 4.2.2 Limitaciones

La información catastral por lo general no contiene todas las características estructurales que son necesarias para la evaluación de la vulnerabilidad, por ejemplo irregularidad vertical, piso blando, torsión, columnas cortas, entre otros.

La información catastral puede no haber sido bien recolectada, debido a que el técnico catastral no tiene los conocimientos básicos de ingeniería y construcción.

Es necesario que la región en estudio tenga información relativa a los peligros que amenazan dicha región (sismo, deslizamiento, licuación, entre otros), para poder evaluar el peligro.

#### 4.2.3 Equipo y Software Utilizado

Son dos los grupos de programas usados en este estudio, en lo que respecta a software, el primero son herramientas SIG y el segundo es una herramienta que maneja datos.

La definición más universal de un SIG es: "Un sistema de cómputo compuesto de hardware, software, y procedimientos diseñados que soporta la captura, administración, manipulación, análisis, modelamiento y visualización de la información georeferenciada espacialmente para resolver problemas complejos de administración y planeamiento". El esquema mostrado en la Figura 4-2 nos muestra el rol de esta herramienta en la gestión del riesgo.

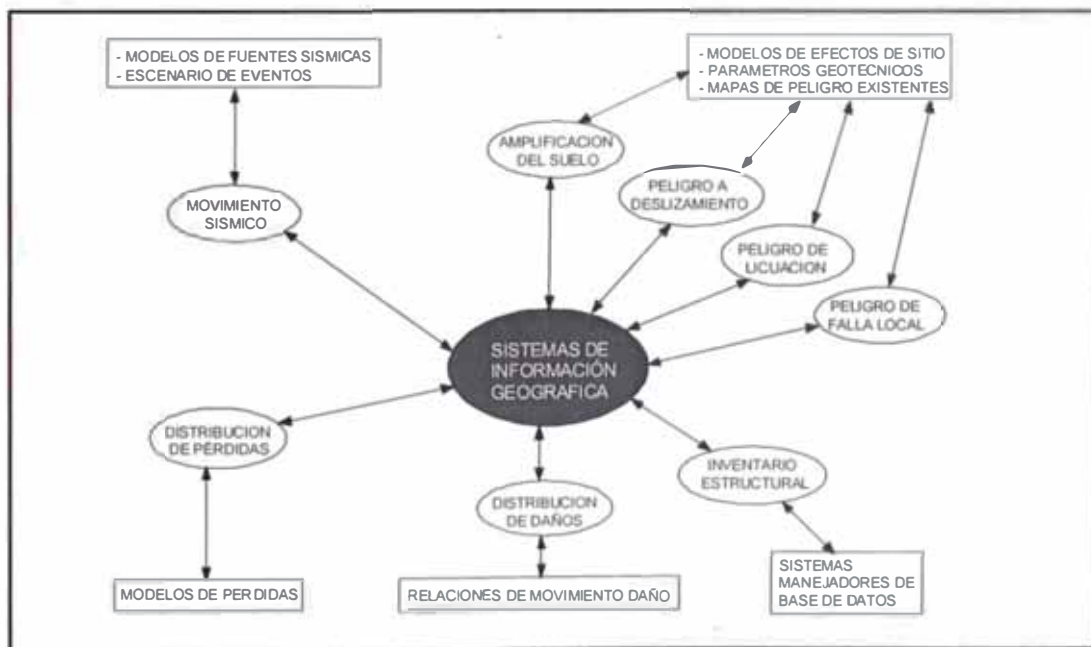


Figura 4-2: Rol de los sistemas de información geográfica en el análisis de peligro y riesgo sísmico (King, A. 1994)

Para la elección de las herramientas SIG se buscó un grupo de programas que permitan alcanzar los objetivos del estudio, así como que presenten características de robustez, portabilidad y una amplia aplicación a nivel nacional y mundial. Los productos ESRI (Environmental System Research Institute), líder mundial en tecnologías SIG nos ofrecen estas características. Estos programas son: ArcView 3.2, Spatial Analyst 1.0a y 3D Analyst 1.0, herramientas netamente orientadas a la manipulación y análisis de datos espaciales. Pero aún nos falta mencionar una herramienta que nos permita capturar información georeferenciada. Aunque el ArcView 3.2 tiene algunas opciones para la captura y edición de datos espaciales, éstas sin embargo son básicas, existiendo otras herramientas orientadas a este tipo de trabajo. El ArcCAD ó el propio ArcInfo, ambas también marcas registradas por ESRI, cumplen ese requisito. Sin embargo el AutoCAD puede suplir a estas herramientas con sus respectivas restricciones, y es este último el que se ha usado, debido a que toda la información recopilada estuvo en dicho formato.

Un sistema administrador de bases de datos (SABD) es una aplicación para crear bases de datos incluyendo su estructura lógica, física, y reglas de integridad. Existen varias SABD desde Access hasta Oracle. Access es un SABD de fácil acceso y ampliamente conocido, sin embargo tiene ciertas dificultades en cuanto a robustez. La robustez en una base de datos es muy importante para el objetivo que persigue esta tesis, debido a que el inventario de estructuras de una ciudad es amplio, y más aún debe amoldarse a la dinámica de crecimiento de las grandes urbes. Oracle es un SABD líder mundial en base de datos, que sobrepasa las exigencias del estudio, pero necesita un alto nivel de especialización para administrar esta base de datos, por lo que sería bueno implementarla en un futuro. Visual Fox Pro es una herramienta que sirve para administrar archivos planos (un archivo plano es un archivo de datos estructurado), y aún sin ser SABD cumple con las exigencias del proyecto pues es un programa medianamente robusto, un nivel medio de especialización y con una alta eficiencia, por lo que este último fue el elegido.

Realmente no se hizo necesario usar todo el equipamiento necesario para la implementación de un SIG debido principalmente a que la mayor parte de la información geográfica estaba en formato digital. No obstante si se hizo necesario disponer de una

computadora con una alta capacidad de procesamiento y una buena performance en el procesamiento de archivos gráficos.

### **4.3 Aspectos Socio-Económicos de la Ciudad de Moquegua**

La ausencia de conocimiento de las realidades y racionalidades que caracterizan a las comunidades vulnerables influye para que la prevención y el manejo de los desastres adquieran características irreales ó no apropiadas a la realidad de la población.

Aunque los temas sociales no son analizados en el presente estudio, una revisión de todos los aspectos que participan en la gestión del riesgo se expone en este acápite de modo que este trabajo sirva de base para la estimación del riesgo holístico. Las siguientes líneas son un listado de las variables socio-económicas que participan en un análisis de riesgo holístico.

#### *Urbano*

- Características físicas de las construcciones.
- Usos del suelo.
- Grado de ocupación de consolidación.
- Modalidad de ocupación.
- Tugurización: tipos, grados y estado actual.

#### *Equipamiento Urbano*

- Equipamiento de comercialización y de abastecimientos de productos alimenticios.
- Educativo, Salud, Recreación, Turismo, Socio - Cultural y Administrativo.
- Industrias: ligera y pesada.
- Vialidad y transporte urbano.
- Transporte Aéreo, Marítimo: estado actual; planes y proyectos.
- Servicios públicos: Agua y desagüe (sanitario y pluvial); Telefónico, Eléctrico, Limpieza pública.

#### *Demográfica*

- Población provincial y tasas de crecimiento demográfico.
- Población Distrital y tasas de crecimiento.
- Población Urbana y Rural por distritos.
- Población en Asentamientos Humanos Marginales.



### *Económica*

- Empleo provincial.
- Empleo por distritos.
- El sector Informal.
- Niveles de ingreso y consumo.
- Estado actual de la Economía Provincial.
- Espacios productivos de la provincia: Sector Agropecuario, Pesca, Industria, Comercio.
- Estado Actual de las economías distritales.

### *Social*

- Organizaciones sociales existentes dentro de cada distrito: Nivel de organización, tipos, Estado actual de éstas.

### *Cultural*

- Conciencia de la población: Grado de importancia a los desastres, peso asignado a determinado peligro.
- Influencia de los medios de comunicación en la población.

### *Política - Administrativa - Institucional*

- Gestión Local: gestión y coordinación; la gestión del Estado en la provincia.
- Administración Local: Organismos de Nivel Central, Regional, Nivel de gobiernos locales.
- Planificación Local: Organismos de Nivel Central y Regional, nivel de gobiernos locales, espacios de coordinación intersectorial y estado actual de planes

## **4.3.1 Población**

*Población Total:* Según la división política-administrativa, el departamento de Moquegua tiene 3 provincias y 20 distritos.

En el departamento de Moquegua, existe una desigual distribución de la población entre sus divisiones Político-Administrativas. La provincia de Mariscal Nieto, la más poblada del departamento (58,503 habitantes), es tres veces la población de la provincia General Sánchez Cerro (19,507 habitantes), que es la menos poblada del departamento, como se puede observar en la Tabla 4-1.

La provincia de Mariscal Nieto aumenta ligeramente su importancia poblacional entre 1981 y 1993.

**TABLA 4-1:** Distribución de la Población Total por Provincias en el Dpto. de Moquegua.

PROVINCIA	POBLACIÓN					
	1972		1981		1993	
	ABSOLUTO	%	ABSOLUTO	%	ABSOLUTO	%
Total	78012	100,0	103283	100,0	130192	100,0
Mariscal Nieto	31955	41,0	45754	44,3	58503	44,9
Gral. Sánchez	19672	25,2	18266	17,7	19507	15,0
Ilo	26385	33,8	39263	38,0	52182	40,1

Fuente: INEI - Censos nacionales de 1993

*Población Urbana y Rural:* La población en los centros poblados urbanos del departamento de Moquegua representa el 82,8% observándose que en la provincia Mariscal Nieto el 86,0% de su población es urbana. La Tabla 4-2 muestra la distribución de la población urbana y rural durante los años 1972 y 1993.

En el período intercensal 1981-1993, la provincia de Mariscal Nieto concentra una mayor proporción de población urbana, al pasar de 78,3% en 1981 a 86,0%, en 1993. Del total de la población urbana, la provincia de Mariscal Nieto alberga al 46,8%.

**TABLA 4-2:** Población urbana y rural en la Provincia de Mariscal Nieto.

AÑO	POBLACIÓN	
	URBANA	RURAL
1972	22608	7896
1981	35267	9746
1993	49855	8084

Fuente: INEI - Censos nacionales de 1993

### 4.3.2 Características de las Viviendas

En 1993 se empadronaron 38,649 unidades habitacionales en el departamento de Moquegua. Esta cifra, relacionada con la obtenida en 1981, evidencia que el número de viviendas en el departamento de Moquegua ha crecido aproximadamente cada año en 1,023 unidades. En términos globales ello significa un aumento de 12,274 viviendas, en el período intercensal. La Tabla 4-3 muestra el número de ocupantes por tipo de vivienda para 1981 y 1993.

**TABLA 4-3:** Total de viviendas particulares empadronadas en el Dpto. de Moquegua, según tipo de vivienda.

TIPO DE VIVIENDA	VIVIENDAS PARTICULARES CON OCUPANTES PRESENTES		POBLACION EN VIVIENDAS PARTICULARES		HABITANTES POR VIVIENDA	
	1981	1993	1981	1993	1981	1993
<b>TOTAL</b>	21578	30511	96300	124080	4.5	4.1
<b>CASA INDEPENDIENTE</b>	17938	24362	81238	102114	4.5	4.2
<b>DPTO. EN EDIFICIO</b>	2070	2213	9679	8849	4.7	4
<b>VIV. EN QUINTA</b>	65	111	269	470	4.1	4.2
<b>VIV. EN CASA DE VECINDAD</b>	990	341	3281	1204	3.3	3.5
<b>VIV. IMPROVISADA</b>	399	3031	1469	10085	3.7	3.3
<b>CHOZA O CABAÑA 1/</b>	-	313	-	904	-	2.9
<b>NO CONST. PARA VIV.</b>	105	136	327	448	3.1	3.3
<b>OTRO TIPO DE VIVIENDA</b>	11	4	37	6	3.4	1.5

Fuente : INEI – Censos nacionales de 1993

Se advierte que el número promedio de habitantes por vivienda, que en 1981 era de 4.5 personas disminuye a 4.1% en 1993. Esta información es indispensable para la evaluación del riesgo, pues

nos indica el número de personas expuestas al nivel de amenaza de una determinada zona.

En lo que respecta a la provincia de Mariscal Nieto, se han empadronado un total de 13392 viviendas particulares con ocupantes presentes, cuya distribución de acuerdo al tipo de edificación puede observarse en la Tabla 4-4.

**TABLA 4-4:** Viviendas particulares con ocupantes presentes según tipo de vivienda en la Provincia de Mariscal Nieto (1993)

Tipo de vivienda	Cantidad	%
Casa independiente	11682	87.23%
Departamento en Edificio	872	6.51%
En quinta	81	0.60%
Vivienda en casa vecindad	241	1.80%
Improvisado	292	2.18%
Chozas ó Cabañas	183	1.37%
No construida para vivienda	39	0.29%
Otro tipo de vivienda	2	0.01%

Fuente : INEI – Censos nacionales de 1993

El material de construcción predominante es el adobe y la tapia, como se observa en la base de datos del INEI para el año 1993, donde se reporta que el 64.40% tienen como material predominante en sus paredes el adobe o tapia, el 28.60% tienen paredes de ladrillo o bloque de concreto y el 2.2% tienen paredes de estera. Un resumen de la distribución de viviendas según los tipos de materiales se muestra la Tabla 4-5.

**TABLA 4-5:** Viviendas particulares según material predominante en las paredes, en la Provincia de Mariscal Nieto.

Material predominante en las paredes	%
Ladrillo o bloque de concreto	28.60
Piedra ó sillar	0.70
Adobe o tapia	64.40
Quincha	1.30
Piedra ó con barro	2.40
Madera	0.20
Estera	2.20
Otro material	0.20

Fuente : INEI – Censos nacionales de 1993

Los resultados del censo de 1993 a nivel del departamental, muestran un fuerte incremento en el número de viviendas cuyo material predominante en las paredes es el adobe o tapia. Así mismo, se observa una alta tendencia a usar materiales ligeros en los techos. La Tabla 4-6 nos muestra el número de edificaciones de acuerdo al tipo de techo.

**TABLA 4-6:** Viviendas particulares según material predominante en los techos, en la Provincia de Mariscal Nieto.

Material predominante en los techos	%
Concreto Armado	25.9%
Madera	0.6%
Tejas	1.1%
Calamina o fibra de cemento	37.6%
Estera	29.6%
Paja ó hoja de palma	3.1%
Otro material	2.1%

Fuente : INEI – Censos nacionales de 1993

La tabla 4-7 muestra el número de ocupantes en edificaciones de material ligero. Se considera material ligero a las viviendas con quincha, piedra con barro, madera, estera y otro material (cartón, eternit, calamina, triplay, etc.).

**TABLA 4-7:** Provincia de Mariscal Nieto: Viviendas particulares con ocupantes presentes por material ligero en las paredes : 1993

VIVIENDAS			OCUPANTES PRESENTES			OCUPANTES POR VIVIENDA
TOTAL	CON MATERIAL LIGERO	%	TOTAL	OCUPANTES EN VIVIENDA CON MATERIAL LIGERO	%	
13392	842	6,3	55366	2959	5,3	3,5

Fuente : INEI – Censos nacionales de 1993

La Tabla 4-8 muestra un resumen de las estadísticas sobre número de viviendas particulares para el Departamento de Moquegua y para la Provincia Mariscal Nieto.

**Tabla 4-8:** Resumen del número viviendas particulares y condición de ocupación según área urbana y rural

VIVIENDAS PARTICULARES	DEPARTAMENTO MOQUEGUA	PROVINCIA MARISCAL NIETO
Total	38649	17060
Ocupadas	36744	16301
Ocupantes presentes	30511	13392
Area Urbana	30547	-
Area Rural	8102	-

Fuente : INEI – Censos nacionales de 1993

El total de viviendas particulares del distrito de Moquegua de acuerdo al censo del año 1993 es 9103. Se ha estimado el total de viviendas en área urbana para el año 2001, en la Ciudad de Moquegua, de acuerdo al índice de crecimiento anual del número de viviendas para el periodo intercensal 1981-1993 cuyo valor es 3.8%. Este valor estimado es de 12268 viviendas particulares.

#### 4.3.3 Evolución y Proceso de la Consolidación Urbana

El desarrollo de la ciudad de Moquegua ha estado en función de la agricultura y ganadería, en la década de los años '50 la ciudad se emplazó en la parte baja del valle, en un lugar relativamente plano, con viviendas de adobe y quincha. En los años '60 con la ampliación de su frontera agrícola y fundamentalmente con el auge de la minería, la ciudad se expandió desordenadamente hacia el norte y sur; pero debido a la falta de terrenos adecuados y cercanos a la ciudad se fueron poblando las laderas del cerro El Siglo y Mariscal Nieto, es así que muchas de estas edificaciones colapsaron en el sismo del 23 de Junio.

El proceso de urbanización se ha dado por dos patrones de asentamiento claramente diferenciados, formales e informales.

- La zona monumental se consolida en las laderas superiores del Valle, para evitar utilizar tierras agrícolas por ser éstas muy productivas y rentables. Esta zona conserva la arquitectura tradicional de la época colonial y republicana, con sus calles angostas, casonas, iglesias y sus techos tipo hastial y de mojinete. Tiene una densidad alta y concentra las actividades comerciales.

Posteriormente en los años '70, producto de las fuertes migraciones son invadidos los terrenos ubicados en el contorno de la ciudad. En muchos casos éstos se ubican en zonas de alto riesgo y fueron urbanizados sin planificación. En esta etapa aparecen tres asentamientos: San Francisco, El Siglo y Mariscal Nieto.

En el año de 1990 ENACE identifica terrenos aptos para fines urbanos, así se inicia la habilitación de San Antonio y los cerros de San Francisco. Paralelamente son invadidos los terrenos alrededor de esta habilitación.

Cabe mencionar que la topografía de la ciudad de Moquegua es irregular, rodeada de altos cerros que de una forma natural definen el espacio; es por ello que los asentamientos se han consolidado en núcleos urbanos y la oferta de terrenos con dichos fines es muy limitada.

A la fecha se aprecia que muchas de las nuevas construcciones se realizan sin licencia de construcción y no respetan el Reglamento Nacional de Construcciones.

#### **4.3.4 Infraestructura Vial**

El sistema vial local está conformado por calles angostas y de fuerte pendiente, producto de la topografía accidentada de la ciudad. La principal deficiencia de este sistema es la no continuidad de sus principales avenidas.

En el ámbito regional está conectado con los distritos de Mariscal Nieto e Ilo, sin embargo con la provincia de Sánchez Cerro solo existe integración con el distrito de Omate, siendo deficiente para el resto de la provincia.

En el ámbito nacional está integrada mediante la carretera Panamericana con las ciudades del Norte y Sur del país; por el Oeste con la carreta Binacional Ilo - Desaguadero, que la conecta a las ciudades Alto andinas y al país de Bolivia.

**Redes viales principales:** Entre las vías principales tenemos: Carretera Panamericana Sur (asfaltada), la carretera binacional Ilo-Desaguadero (asfaltada), Puno-Desaguadero-Moquegua (asfaltada) y otras carreteras que unen las ciudades del interior.

La Carretera Panamericana Sur empieza en Lima, une la Región Sur del Perú por la zona de la costa y continua hasta Chile. La carretera binacional, Ilo-Desaguadero, integra al Perú con Bolivia. Esta se encuentra ubicada en la Región Sur del Perú, se inicia en el Puerto de Ilo y llega hasta Desaguadero, en la frontera con Bolivia. Su altitud varía desde 15 msnm (Ilo), hasta los 3809 msnm que corresponde a Desaguadero, con una longitud total de 397 Km. Hay que mencionar que esta carretera comunica la ciudad de Moquegua con varios poblados del interior del país.

Desde Puno a Desaguadero la carretera es asfaltada, la cual une los poblados de Ilave, Yunguyo, Juli, Pomata y Zepita, y se conecta con la carretera binacional (Ilo-Desaguadero).

**Redes viales secundarias:** Entre las carreteras secundarias tenemos las que parten de las principales ciudades hasta el interior del país. Estas son carreteras afirmadas y trochas carrozables, se incluyen en esta categoría a los caminos de herradura. Se pueden mencionar las siguientes vías: Ilave – Mazo Cruz, Tarata-Tacna, Arequipa-Ubinas, Arequipa-Omate-Quinistaquillas, Arequipa-Matalaque, Candarave-Tarata-Tacna, así como los accesos desde la carretera binacional a los poblados de Omate, Calacoa, Carumas, Kelluyo, Pizacoma, y otros más.

**Aeropuertos:** En el área de estudio existe un aeropuerto, ubicado en el Distrito de Moquegua, el tipo de superficie es de asfalto, con una elevación de 1365 msnm, y con un largo de pista de 1800 m.

#### **4.3.5 Principales Actividades Económicas de la Región**

En el área de estudio los recursos de agua, tierras de cultivo y pastos, son escasos, en consecuencia la producción agrícola y ganadera, y sus derivados manufacturados, son de pequeña escala. Por otro lado, los recursos mineros, especialmente los cupríferos, son cuantiosos.

La agricultura está reducida a la explotación de los terrenos cultivables que existen a lo largo del fondo o piso de los valles, y por lo general las tierras agrícolas están muy parceladas.

En el valle de Moquegua se cultivan plantas de clima cálido, tales como la palta, vid, frutales de toda clase, maíz, alfalfa y otros recursos de pan llevar. En los tramos superiores del río Moquegua, mejor dicho en los valles de sus tributarios que atraviesan el flanco



andino, la agricultura se reduce a la siembra de alfalfa, maíz, papa, habas, trigo, cebada, hortalizas, etc., hasta altitudes que llegan a 3000 - 3200 msnm, por arriba de estos niveles no hay sembríos.

En general, la producción agrícola apenas logra abastecer las necesidades locales; además es de mencionar que se ha incrementado la productividad de paltas. Gracias al convenio Español PADA se ha conformado la cooperativa Guadalcazar, que en la actualidad pone este producto en los mercados de Lima y del exterior. También se viene promocionando el cultivo de la vid, cultivo tradicional de esta ciudad, a la fecha están registradas 10 empresas dedicadas a la transformación de la vid, en vino, pisco, anisado, coñac y macerados. La calidad de estos productos se debe en gran parte al clima y al suelo que le agrega a los productos un sabor y aroma especial.

La ganadería está representada principalmente por la crianza de vacunos en los sectores bajos, y por ovinos y llamas en las partes altas. La producción de leche es destinada al consumo local, a la empresa de leche Gloria y a empresas de transformación de derivados lácteos de quesos, yogurt, etc.

La minería es la actividad productiva más importante en Moquegua. En el cuadrángulo quedan los depósitos cupríferos de Toquepala, Quellaveco y Cuajone, con una reserva acumulada del orden de 1200 millones de TM. de mineral con ley de 0.8 a 1% de cobre.

Además de los yacimientos citados, existen en el área depósitos más pequeños que a la fecha se encuentran inactivos. Para usos locales en forma esporádica se explotan las areniscas y arcillas del miembro inferior de la formación Moquegua.

#### **4.3.5.1 Proyecto Especial Pasto Grande**

Fue creado el 18 de Noviembre de 1987, sus obras se desarrollan dentro del departamento de Moquegua, en las provincias de Mariscal Nieto e Ilo. Con este proyecto se desarrolla una importante actividad agrícola, ahora con mayores expectativas al haberse ampliado la frontera agrícola con 10,000 Has nuevas de cultivo y el mejoramiento de riego de 2,900 Has en los valles de Moquegua, Ilo y Torata.

El principal objetivo es la reactivación agrícola con el mejoramiento de riego en las áreas de cultivo existentes, incorporando tierras eriazas mediante riego presurizado en Estuquiña, San Antonio, Jaguay, Rinconada, Hospicio y las lomas de Ilo, para abastecer una agroindustria de exportación. Así mismo, abastecer de agua para el uso doméstico e industrial a las ciudades de Moquegua e Ilo y generar energía eléctrica interconectada al sistema sur.

Deriva las aguas de la cuenca del Atlántico a la presa de Pasto Grande la que se ubica en el cuadrángulo de Huaytire a una altitud de 4415 msnm, con una capacidad de almacenamiento de 185 millones de m<sup>3</sup>.

Cuenta con la construcción del túnel Jachacuesta, ubicado a una altitud de 4500 msnm, con longitud total de 7046 m, sección de 11m<sup>2</sup>, diámetro libre de 2,80 m, y con capacidad de conducción de 17,5 m<sup>3</sup>/seg. De igual modo cuenta con la Bocatoma Otorá.

La presa Humalso, se ubicará en las pampas del mismo nombre, distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto, entre las costas de 4000 a 4300 msnm. Esta obra aún no se ha efectuado.

#### **4.3.5.2 Actividad Minera**

En el departamento de Moquegua se desarrolla la explotación de cobre más importante del país. El Centro Minero de Cuajone representa para el estado un aporte de 20.15% al producto bruto interno del aporte nacional, y el consorcio ASARCO-CYPRUS-Grupo México, es la encargada de su explotación. La extracción del mineral es a tajo abierto. El beneficio metalúrgico se efectúa en plantas, empleando concentración de minerales por flotación, lixiviación, fundición-refinación y otros. La Tabla 4-9 muestra las principales unidades de producción.

**Tabla 4-9:** Principales Unidades de Producción Minera Metálica y no Metálica

EMPRESA	UNIDAD	SUSTANCIA	UBICACIÓN	
			PROV.	DISTRITO
ASARCO-CYPRUS-Grupo México	Cuajone	Cobre	Mrcal. Nieto	Torata
Antonio de Col EIMRL	Huracané	Sílice	Mrcal. Nieto	Moquegua
Antonio de Col EIMRL	Dieguito	Sílice	Ilo	Pacocha

Fuente: Dirección General de Minería

#### 4.4 Análisis de la Vulnerabilidad Física

El análisis de Vulnerabilidad Sísmica de las construcciones (los edificios, plantas, los componentes de líneas de la vida como los puentes, los tanques, las instalaciones de agua y desagüe, etc.) ha sido el objeto de mucho trabajo hecho por investigadores y operadores técnicos en los años recientes.

Una clasificación diferente para evaluar los métodos de análisis de vulnerabilidad ha sido propuesta por Spence R.(1992), quien, en lugar de referirse a las metodologías pre-definidas, considera cada uno separadamente en tres pasos fundamentales que caracterizan el camino metodológico y califican a un análisis de vulnerabilidad: Entrada, Método, Salida.

5 clases de Entradas, 3 clases de Métodos y 2 clases de Salida son consideradas como sigue.

##### Entrada

- Datos de daños (1): Datos que fueron coleccionados después de los terremotos u se obtuvieron a través de las pruebas de laboratorio experimentales solo en elementos o componentes.
- Características geométricas y cualitativas (2): Como la altura, configuraciones de elevación, antigüedad, tipo de estructuras verticales y horizontales, tipo de cimentación y cobertura, reparaciones eventuales, estado de conservación, la calidad de materiales, etc., para los edificios.

- Características Mecánicas cuantitativas (3): como la masa, rigidez, resistencia, la ductilidad intrínseca, los desplazamientos estáticos, dinámicos, etc.
- Características de la acción sísmica (4): como intensidad macrosísmica, aceleración ó velocidad pico del terreno, EPA, acelerogramas, etc.
- Información Geológica y datos geotécnicos del sitio (5): como el tipo y las características mecánicas de la cimentación, el comportamiento sísmico de los perfiles geológicos, etc..

#### Método

- Métodos estadísticos (1): los análisis estadísticos de grandes muestras de construcciones similares sujeto a un terremoto en el pasado.
- Métodos mecánicos (2): parámetros mecánicos que gobiernan el comportamiento sísmico de construcciones, la ductilidad, etc., se evalúan por los modelos mecánicos.
- Métodos basados en opinión de expertos (3): las evaluaciones cualitativas ó cuantitativas de factores de daño que gobiernan el comportamiento sísmico de las construcciones y su combinación son basadas en el conocimiento de expertos.

#### Salida

- Vulnerabilidad absoluta (1): funciones de vulnerabilidad, es decir el daño medio como una función de la intensidad sísmica, o distribuciones condicionales de daño dada la intensidad sísmica (Matrices de Probabilidad de Daño ó curvas de Fragilidad).
- Vulnerabilidad relativa (2): los índices de vulnerabilidad estimados heurística / empírica ó experimentalmente no tienen ninguna correlación con el daño y la intensidad sísmica; ellos sólo permiten alinear las construcciones según su vulnerabilidad sísmica.

Muchas investigaciones han hecho uso de diferentes tipos de ENTRADA, al mismo tiempo. También se usan mezclas de METODOS, y se producen diferentes tipos de SALIDA.

En el análisis de vulnerabilidad presentado aquí solo se evaluarán las edificaciones, de acuerdo a los tipos estructurales existentes en la ciudad de Moquegua. Está investigación al igual que otras hace uso de diferentes ENTRADAS, como son: Datos de daños (1), Características de la acción

sísmica (4), Características geológicas geotécnicas locales (5). El MÉTODO estadístico (1) fue utilizado para obtener como SALIDA vulnerabilidad absoluta (1) como se muestra en la Tabla 4-10.

**Tabla 4-10:** Entradas, Método y Salida utilizadas en la presente investigación.

ENTRADA	MÉTODO	SALIDA
1. Datos de daños	1. Estadístico	2. Vulnerabilidad absoluta
3. Características de la acción sísmica		
4. Características geológicas geotécnicas locales		

Los datos de daños recolectados por la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto tienen ciertas deficiencias, debido principalmente a la falta de asesoría técnica para la evaluación post-sísmica de edificaciones, por lo que los resultados del análisis de vulnerabilidad efectuado en el presente trabajo no serán usados para el análisis del riesgo sísmico. Sin embargo este análisis nos ha permitido comparar curvas de vulnerabilidad de otras regiones: Antofagasta (Chile), Costa Rica, Estado de Utah (EEUU), y elegir la curva más apropiada para la ciudad de Moquegua.

Las características de la acción sísmica fue analizada en el capítulo 3 y las características geológicas y geotécnicas locales se obtuvieron del estudio de Microzonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua (convenio UNI-CONCYTEC).

#### 4.4.1 Definiciones De Daño

Existen varios parámetros usados para expresar daños por terremotos y términos tal como “proporción de daño”, “factor de daño”, e “índice de daño” los cuales tienen diferentes significados para diferentes autores. El daño regional puede ser dado, por ejemplo, en porcentaje de pérdidas financieras o porcentaje de estructuras dañadas para una cierta intensidad sísmica. El daño para una estructura puede ser descrito en términos de daños a los elementos individuales, frecuentemente basado sobre medidas de respuesta dinámica. El término “índice de daño” es típicamente tomado para medir la caracterización de un elemento individual (local) o de la estructura entera (global), es decir el daño basado sobre parámetros de respuesta tal como proporción de ductibilidad,

disipación de energía entre otros. Es evidente que para el desarrollo de estudios de vulnerabilidad sísmica a gran escala VSG, como es el caso de este estudio, no se pueden utilizar metodologías analíticas.

El termino “proporción de daño” (ATC-13, 1985) es típicamente definido como:

$$\text{Proporción de daño} = \frac{\text{Número total de estructuras dañadas}}{\text{número total de estructuras}} \quad (4.1)$$

El nivel de daño requerido para una edificación a ser considerada “dañada” es frecuentemente ambiguo, sin embargo se espera que en un futuro se homogenicen los criterios para la evaluación de daños. Actualmente en el CISMID se están elaborando fichas de evaluación basadas en el ATC-21 que nos permita evaluar daños post-sismo con criterios homogenizados.

La medida más ampliamente usada de daños en terremotos es una expresión de daños en términos de pérdidas financieras que pueden ser aplicadas a todo tipo de estructuras (Rojahn, 1993). Esta medida típicamente es llamada “Factor de Daño” y es definida como (ATC-13).

$$\text{Factor de daño}(FD) = \frac{\text{Pérdida en dólares}}{\text{Costo de reemplazo}} \quad (4.2)$$

Ambas definiciones, tanto proporción de daño y factor de daño serán usadas en el presente trabajo.

#### **4.4.2 Relaciones de Movimiento - Daño**

Las relaciones movimiento – daño son usadas para estimar el daño durante un terremoto para cada tipo de edificación debido a varios niveles de movimiento del terreno. Estas relaciones, también llamadas como funciones de vulnerabilidad, son típicamente expresadas en términos de (Kiremidjian, 1992):

- Curvas de Pérdida-Daño: Estas relaciones, fueron desarrolladas por Algermisen y Steinbrugge(1984) para el uso de las oficinas de servicios de seguros. Ellos estiman proporción de daños medios (número de edificaciones dañadas, dividido por el total de edificaciones en una región) como una función de intensidad de movimiento del terreno para diferentes tipos de edificaciones.

- Curvas de Fragilidad: Estas curvas (Kircher and McCann, 1983) describen la probabilidad que un nivel de daño especificado será excedido para una intensidad de movimiento dado. Las curvas son desarrolladas para todo tipo de servicios en la forma general:

$$P\{D \geq d | Y\} = 1 - F_{D|Y}(d | Y) \quad (4.3)$$

Donde:

D, d = Niveles de daño

Y = Intensidad de movimiento del terreno

- Matrices de Probabilidad de Daño (MPD): primero introducidas por Martel (1964) y más tarde modificada por Whitman (1973), describe la probabilidad que una estructura está en un estado de daño especificado dado el nivel de intensidad del movimiento. En el ATC-13 (Consejo de tecnología aplicada, 1985, California), estas probabilidades son derivadas desde la distribución de probabilidad para una intensidad de movimiento dado,  $f_{D|Y}(d | Y)$ , donde Y, D y d están definidas en la ecuación 4.3, ilustrando así la relación analítica entre las MPDs y las curvas de fragilidad. Una distribución beta es frecuentemente usada para describir la incertidumbre en daños para una intensidad de movimiento dada.
- Curvas de factor de daño esperado: Estas curvas son solo otra representación de la relación entre daño e intensidad del movimiento del terreno que pueden ser usadas para derivar MPDs y curvas de fragilidad (ATC-36). No hay diferencia en la información que es expresada o puede ser obtenida a través del uso de curvas de fragilidad, MPDs y curvas de daño esperado. Con los parámetros  $(\lambda, \nu)$  de la distribución Beta  $f_{D|Y}(d | Y)$  conocidos, los valores esperados y la desviación estándar del daño por cada nivel de intensidad dado puede ser calculada de la siguiente manera:

$$E[D | Y] = 100 \frac{\lambda}{\lambda + \nu} \quad \text{en \%} \quad (4.4)$$

$$\sigma_{D|Y} = 100 \frac{\sqrt{\lambda \nu}}{(\lambda + \nu) \sqrt{(\lambda + \nu + 1)}} \quad \text{en \%} \quad (4.5)$$

En el Anexo A se muestra una representación de las diferentes relaciones de movimiento-daño explicadas líneas arriba.

La mayoría de los países incluyendo los sudamericanos han elaborado sus propias curvas de vulnerabilidad y no solo a nivel de

país sino a nivel de las ciudades importantes. En el Perú no se han elaborado curvas de vulnerabilidad, por tanto para alcanzar el objetivo del estudio se hizo una revisión de diferentes curvas alrededor del continente:

- Utah: Curvas de factor de daño elaboradas para el estado de Utah, EE.UU., como parte del ATC-36(1994). Estas curvas están basadas en las Matrices de probabilidad de daños MPDs del ATC-13 (1985). Los METODOS utilizados para desarrollar estas MPDs son: el basado en la opinión de expertos(3) y el estadístico(1), tiene como ENTRADAS datos de daños(1), características geométricas y cualitativas(2) y características de la acción sísmica(4), teniendo como SALIDA la vulnerabilidad absoluta (1).
- Costa Rica: Curvas de proporción de daños elaboradas por Sauter y Shah (1978), para diez tipos de edificaciones típicas en Costa Rica.
- Antofagasta: Curvas de proporción de daños, elaboradas considerando estadísticas de daños del terremoto del 3 de Marzo de 1985 en la zona central y tomó en cuenta los tipos estructurales más comunes de Chile. Posteriormente, en el año 2000, fue adaptada para la ciudad de Antofagasta.

Las curvas mencionadas anteriormente y la descripción de sus tipos de edificaciones se muestran en el Anexo B. Las curvas de Antofagasta fueron usadas para generar los escenarios sísmicos planteados en el estudio. La selección de estas curvas de vulnerabilidad es sustentada en los siguientes acápites.

#### **4.4.3 Estudios Previos de Vulnerabilidad en la Ciudad de Moquegua**

Varios estudios de vulnerabilidad y evaluación de daños fueron desarrollados para la ciudad de Moquegua en los últimos años, algunos de los cuales se mencionan a continuación:

**Estudio de Vulnerabilidad Sísmica en La Ciudad de Moquegua,** (Lázares, 1994): Analiza la vulnerabilidad y el riesgo en términos cualitativos. La clasificación y descripción de las edificaciones utilizadas en ese trabajo se muestran en el Anexo C. Usando tablas que relacionan el porcentaje de tipos de edificación, vulnerabilidad, tipos de suelos y peligro se determinaron los niveles



de daño y riesgo cualitativo. Sus resultados muestran una alta vulnerabilidad y un alto riesgo para la zona Norte del Cercado, PP.JJ. Mariscal Nieto, PP.JJ. San Francisco y El Siglo, para una intensidad VIII en la escala de MMI propuesto por Kuroiwa (1992). Sin embargo las autoridades de la ciudad no hicieron nada por prevenir y mitigar los posibles daños y riesgos determinados en este estudio, y como resultado de ésto tenemos muchas víctimas y cuantiosas pérdidas económicas ocurridas durante el sismo del 2001.

**Evaluación de Peligros de la Ciudad de Moquegua, (UNSA-INDECI, 2001):** Evalúa los daños después del sismo del 23 de Junio. Dicha estudio solo evaluó las edificaciones dañadas. Esta evaluación es muy somera, pues solo considera dos tipos de edificaciones(edificaciones de concreto y adobe) y dos niveles de daños(agrietado y colapsado). Los resultados muestran una estadística de los daños, así se concluye que el mayor porcentaje de viviendas de adobe colapsadas se encontró en el PP.JJ. San Francisco con un 46%. Finalmente dan algunos lineamientos para la prevención y la mitigación de los desastres.

**Evaluación de Intensidades Macrosísmicas en Moquegua, (IGP, 2001):** Se realizó la evaluación de daños, pero con la finalidad de determinar la intensidades sísmicas. En este trabajo se clasifica a las viviendas según lo estipulado en la escala MSK (esta descripción se puede observar en el Anexo C). El número total de viviendas evaluadas fueron 130 que están distribuidas a lo largo de toda la ciudad. Finalmente este informe concluye que las edificaciones mas dañadas con niveles de daño entre 4 y 5 (destrucción parcial y colapso) respectivamente fueron las edificaciones tipo "A" (adobe ó similar). En base ha esta información determinaron la intensidad para la ciudad de Moquegua, siendo ésta igual a VII en la escala de Mercalli Modificada. El Anexo D muestra una descripción de los niveles de daño según la escala MSK y también muestra una comparación de las escalas de intensidad sísmica usadas a nivel mundial.

#### **4.4.4 Análisis de los Daños Registrados Durante el Terremoto del 23/06/2001**

La evaluación de daños se realizó con la información proporcionada por la Municipalidad Provincial de Moquegua. En ésta se

consideraron tres estados de daño los cuales son: Leve, Grave y Severo.

Estos tres estados o niveles de daño son demasiado subjetivos para poder analizar la vulnerabilidad física de las edificaciones. Primero porque no se definen los rangos de daños y segundo porque con tres niveles de daño es muy probable que genere confusión ó duda a la hora de asignarle un estado de daño y más aún si el personal de campo no está capacitado para este tipo de trabajos.

Como se tenía que comparar las tres curvas de vulnerabilidad (Utah, Costa Rica, Antofagasta) había la necesidad de homogenizar los tipos de edificaciones para las curvas mencionadas anteriormente. Para esto, inicialmente se hizo una codificación en la cual, por ejemplo, el código 4 representaba lo siguiente: para la curva de Utah; edificaciones de mampostería reforzada con diafragma flexible, para la curva de Costa Rica; edificaciones de mampostería reforzada con calidad media y sin diseño sísmico, y para la curva de Antofagasta, edificaciones de uno a tres pisos compuestas por muros de albañilería de bloques de concreto ó ladrillos, enmarcados por pilares y cadenas de hormigón armado. La descripción de las abreviaturas usadas en el presente estudio para diferentes edificaciones es la siguiente:

- PC** : Pórticos de concreto armado
- PC+PLC** : Pórticos de concreto armado con muros de corte
- PC CDS** : Pórtico de concreto armado con diseño sísmico
- PC SDS** : Pórtico de concreto armado sin diseño sísmico
- RM lr** : Mampostería confinada de uno a tres pisos
- RM mr** : Mampostería confinada de cuatro a ocho pisos
- URM** : Mampostería sin confinar
- ACON** : Autoconstrucción

De acuerdo a la evaluación de daños, donde se describen las características cualitativas de las edificaciones y a través de reglas de inferencia, se clasificó las edificaciones evaluadas, de modo que cumplan las condiciones descritas en las tres curvas utilizadas. Por otro lado para poder mostrar dicha comparación en las tablas y en los gráficos subsiguientes se han usado las abreviaturas anteriormente descritas. Así, la Tabla 4–11 muestra la similitud de los tipos de edificaciones para las curvas de vulnerabilidad en

comparación y que posiblemente existan en la ciudad de Moquegua.

**Tabla 4-11:** Similitud de los tipos de edificaciones para las tres funciones de vulnerabilidad a comparar.

FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD	CODIGO PARA LOS TIPOS DE EDIFICACIONES							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ANTOFAGASTA	PC	-	PC+PLC	RM Ir	URM	ADOBE	ACON	RM mr
COSTA RICA	PC CDS	PC SDS	PC+PLC	RM SDS	URM	ADOBE	PROVISIONAL	RM CDS
UTAH	PC	PC URM	PC+PLC	-	-	ADOBE	-	RM

En total se evaluaron 8940 edificaciones, información que fue proporcionada en formato digital (Tablas dBase), de los cuales 2623 tienen información específica de su ubicación, es decir que pueden ser georeferenciadas al entorno SIG mediante un programa. Estas edificaciones se encuentran distribuidas en todos los centros poblados de la ciudad, por lo que esta información fue usada como una muestra aleatoria representativa del total de edificaciones. La Tabla 4-12 muestra el número de edificaciones evaluadas según el tipo estructural y la Lámina L-41 muestra la distribución de éstas en la ciudad.

**Tabla 4-12:** Número de edificaciones evaluadas según el tipo estructural

Tipo de Edificación	Cantidad
ADOBE	1830
ACON	85
MR Ir	677
URM	22
RM mr	9
<b>TOTAL</b>	<b>2623</b>

De la análisis de la información, se puede observar que los brigadistas que realizaron esta evaluación no tenían muy bien definido los niveles de daños. Esto se detectó gracias a que ante la duda algunos consignaron información adicional en las observaciones, por ejemplo ponían nivel de daño Grave, y en observaciones se indica que la vivienda está colapsada, lo que significa que el nivel de daño no es Grave sino Severo.

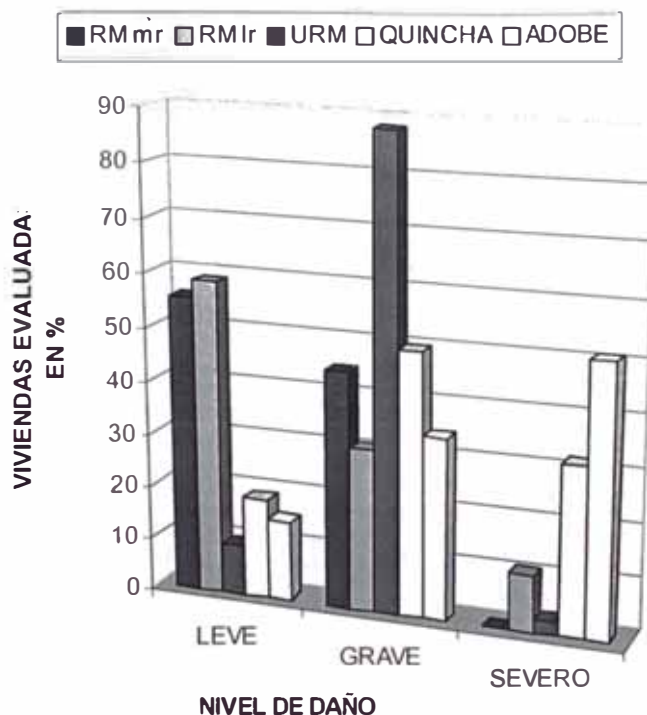
Alrededor de 108 casos pudieron ser detectados gracias a las observaciones, pero es probable que en otros casos no se haya consignado nada en observaciones a pesar que existía la duda.

Varios rangos de daños fueron probados, debido a que no se tenía una equivalencia entre el daño cualitativo (leve, grave, severo) y un daño cuantitativo (expresada en porcentaje de daños). El rango de daños se eligió de acuerdo a la tendencia observada en los predios evaluados. Por ejemplo un rango de daño para una edificación MR-Ir debería contener valores de daño que involucran un nivel similar en las diferentes curvas que se están comparando (Antofagasta, Costa Rica, Utah). Así pues, el rango de daños elegido se muestra en la Tabla 4-13.

**Tabla 4-13:** Rango de daños propuesto para el nivel de daño cualitativo asignado durante la evaluación post-sismo del 23 de Junio de 2001 – Ciudad de Moquegua.

RANGO DE DAÑO EN %	NIVEL DE DAÑO
0-21	LEVE
21-55	GRAVE
55-100	SEVERO

Una vez definido los niveles de daño, se utilizó la caracterización de la amenaza sísmica de la ciudad para el sismo del 2001, la cual fue analizada en el Capítulo 3, en donde se obtuvo una intensidad igual a VIII en la escala Modificada de Mercalli para todas las zonas de la ciudad de Moquegua. Luego se procedió a elaborar la matriz de proporción de daños para una intensidad VIII con los rangos de valores propuestos para los niveles de daño que fueron consignados en campo. La Figura 4-1 muestra la distribución de los daños después del sismo del 23 de Junio del 2001 de acuerdo a la evaluación realizada por la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto.



**Figura 4-1:** Frecuencia de daños en función de cada tipo estructural, según evaluación realizada por la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto.

Los valores promedios de la matriz de daños de Moquegua se compararon con las curvas de vulnerabilidad antes mencionadas, como se muestra en la Tabla 4-14.

**Tabla 4-14:** Comparación de daños para una Intensidad VIII MM

Curvas de Vulnerabilidad	RM Ir	URM	ADOBE	ACON	RM mr
Antofagasta	21.00	38.00	58.00	48.00	5.00
Moquegua	24.56	33.66	51.47	43.00	21.11
Costa Rica	16.00	43.00	50.00	44.00	5.70
Utah	-	39.53	-	-	5.97

De estos resultado se puede observar que:

- El daño promedio para el tipo RM Ir en Moquegua es superior a las otras siendo el valor de Antofagasta el más próximo a éste. Esto indicaría que este tipo de edificaciones en Moquegua son menos resistentes que sus similares en las otras regiones.
- El daño promedio para el tipo URM en Moquegua es inferior a las otras, siendo el valor de Antofagasta el más próximo. Se podría decir que este tipo de edificaciones son más resistentes

que sus similares en las otras regiones. No obstante hay que tener en cuenta que las edificaciones muestreadas, cuyo número es igual a 22, son someramente representativas del total de este tipo de edificaciones existentes en Moquegua.

El daño promedio para el tipo ADOBE en Moquegua es un valor intermedio, siendo el valor de Costa Rica el más próximo. Lo cual estaría indicando que las edificaciones de adobe en Moquegua son mucho más resistentes que las de Antofagasta, Sin embargo el no tener muy claro los niveles de daño grave y severo por parte de los brigadistas podría poner en duda esta conclusión.

El daño promedio para el tipo ACON en Moquegua es un valor intermedio, siendo el valor de Costa Rica el más próximo.

El daño promedio para el tipo RM mr en Moquegua es bastante superior con respecto a las otras regiones.

Aún cuando las deficiencias en la evaluación de daños es un factor importante, los resultados arrojan valores que se esperaban encontrar, pues salvo RM mr, los demás tipos tienen valores similares ó parecidos respecto de las otras matrices. Estos resultados indican que solo son necesarios cuatro tipos para el caso de Moquegua.

Como Antofagasta y Costa Rica tienen valores similares a los de Moquegua, entonces la elección se basó en los aspectos de cercanía y actualidad. Antofagasta está más cerca de la ciudad de Moquegua que Costa Rica, de modo que la percepción de la intensidad sísmica es similar en ambas ciudades. El año en que fueron desarrolladas estas matrices (Antofagasta en el 2000 y Costa Rica en 1978) es un punto muy importante, debido a que, en ese lapso de tiempo se han modificado desde códigos de diseños sismorresistentes hasta normas de construcción en la mayoría de los países a nivel mundial.

Por los motivos explicados anteriormente se eligieron, las curvas de Antofagasta con los tipos estructurales mostrados en la Tabla 4-14, evitando así la creación de curvas híbridas. Sin embargo es importante mencionar que es indispensable elaborar curvas de vulnerabilidad para cada ciudad importante de nuestro país, de modo que la estimación de pérdidas monetarias y no monetarias sea más precisa. Los niveles de daño utilizados en la presente

investigación y sus respectivas descripciones se muestran en el Anexo C.

## **4.5 Inventario de las Edificaciones**

El desarrollo de un completo y detallado inventario de estructuras es típicamente el elemento más crucial en lo que a tiempo se refiere y un caro componente de un análisis sísmico regional. La exactitud de la estimación regional de daños y pérdidas es altamente dependiente de la exactitud del inventario de las edificaciones desarrollado para el área. Aunque la recolección de los datos de edificación por edificación produciría el inventario más exacto, este método no es práctico para un estudio regional. Los métodos más ampliamente usados envuelven una consolidación de información contenida en diferentes bases de datos, en la cual se encuentra contenida el inventario de las diferentes construcciones. El desarrollo del inventario estructural típicamente envuelve cuatro principales partes:

- Identificación de la información requerida ó atributos de la Base de Datos
- Adquisición y revisión de las fuentes de datos disponibles
- Desarrollo de esquemas de clasificación estructural de las edificaciones
- Integración y compilación del inventario completo

### **4.5.1 Información Requerida Para el Inventario**

La información a ser requerida en un inventario estructural frecuentemente depende de las clases de construcciones bajo consideración y el tipo de análisis a realizar. Para la mayoría de los análisis de peligro y riesgo sísmico regional, la información acerca de la ubicación, uso, y propiedades estructurales de cada tipo de construcción es lo que se busca.

Aún para una pequeña región, la base de datos de información estructural puede fácilmente volverse muy extensa, resultando en una excesiva demanda de almacenamiento y consecuentemente en un análisis ineficiente. Por esta razón, el número de atributos(campos) en una determinada tabla debería ser mantenido en un mínimo, usando una base de datos en la cual las tablas estén interrelacionadas. Dicha base de datos debe ser fácilmente actualizable, permitiendo consultar e informar a través del uso de formularios, como los que la mayoría de los manejadores de base de datos actuales ofrecen (Oracle 8.0, VFox Pro, Access). Los

atributos mas comúnmente requeridos para un inventario estructural incluyen:

*Atributos de Ubicación:* Información tal como número y calle de la edificación, georeferenciación de la edificación. Estos son usados para determinar los peligros a que está expuesto dicha construcción, ya sea por el movimiento sísmico u otras amenazas del lugar.

*Atributos de Uso:* Atributos tal como un código de uso o una clasificación social, los cuales serán usados para determinar las pérdidas (Costo de reparación, Pérdida por el no funcionamiento del negocio y otros efectos socioeconómicos).

*Atributos de Propiedades Estructurales:* Información tal como material de construcción, tipo de sistema estructural, edad, altura, área, longitud, y estado de conservación. Estos son usados para determinar la clasificación ingenieril ó indicar el daño estructural esperado para una intensidad sísmica dada.

La base de datos aprovechable para compilar un inventario de estructuras puede frecuentemente estar incompleta, desactualizada, inexacta, ó sólo aprovechable en formato analógico (papel). La compilación de un inventario estructural completo y exacto típicamente requiere de la integración de base de datos existentes, de varias fuentes privadas y públicas. Los atributos perdidos son frecuentemente inferidos desde información conocida, por el uso de opinión de expertos ó lógica difusa. Avances en tecnologías de software, llamado Sistemas de Información Geográfica, Sistemas Manejadores de Base de Datos Relacional, y Sistemas Expertos han incrementado la eficiencia y la exactitud en el desarrollo de inventarios estructurales.

#### **4.5.2 Fuente de Datos Para el Inventario y Esquemas de Clasificación**

Hay numerosas base de datos aprovechables para el desarrollo del inventario, las cuales varían grandemente en integridad, exactitud, y tipo de información incluida. El uso de estas base de datos puede resultar en una gran reducción de tiempo y costo asociado con desarrollar un completo inventario de estructuras de una región. Las bases de datos más frecuentemente usadas como fuentes de inventario de datos incluye:



- Bases de datos de instituciones públicas: INDECI, IGN, INEI, COFOPRI
- Base de datos del gobierno local: Estos por lo general tienen información un poco más detallada, los cuales incluyen datos catastrales de las municipalidades y otras bases de datos conteniendo información regional acerca de servicios tal como estaciones de policías, hospitales, colegios, Bomberos.
- Bases de datos del sector privado: Las empresas que brindan servicios básicos de agua, luz, teléfono, deben tener una amplia información principalmente la socioeconómica. Cabe señalar que en la actualidad existen empresas que proveen imágenes satelitales las cuales pueden ser de gran ayuda en las ciudades en las cuales la información catastral es casi nula ó la información se encuentra en formato analógico (papel). Claro está que para desarrollar una base de datos procesando dichas imágenes, es necesario el uso de software especializado (p. ej. ArcView Image Analysis, Erdas Imagine).

#### *Esquemas de Clasificación e Inferencia*

Primeramente para el desarrollo de un inventario de estructuras, típicamente se requieren de dos sistemas de *clasificaciones*. Un sistema clasifica a cada estructura de acuerdo a su repuesta estructural debido a la excitación sísmica, para propósitos de estimación de daños regionales. El segundo sistema clasifica cada estructura de acuerdo a su uso, para encontrar una estimación regional de pérdidas monetarias y no monetarias. Casi todos los estudios realizados a nivel mundial referente a la evaluación de pérdidas y daños regionales han desarrollado definiciones para estos dos sistemas de clasificación.

El uso de base de datos para el desarrollo del inventario frecuentemente requiere la aplicación de sistemas expertos ó lógica difusa, para inferir atributos perdidos y asignar las dos clasificaciones mencionadas anteriormente. Las reglas de clasificación e inferencia son altamente dependientes del contenido y formato de la base de datos fuente y el conocimiento acerca de la historia y actual estado del desarrollo estructural en la región de estudio. Los siguientes acápite describen la información obtenida, las fuentes y algunos esquemas de clasificación que fueron utilizados para elaborar el inventario de la ciudad de Moquegua.

### 4.5.3 Inventario de las Edificaciones de la Ciudad de Moquegua

Fuentes de datos de instituciones públicas, como es el caso de la Municipalidad de Provincial de Mariscal Nieto, Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), Consejo Nacional de Tasaciones (CONATA), Instituto Catastral de Lima (ICL), fueron obtenidas para este estudio. También se reconoce la colaboración de una empresa privada de la ciudad de Moquegua perteneciente a la Arq. Gina Valdivia.

Diversas reglas de inferencia fueron usadas para elaborar la base de datos de las edificaciones existentes. La siguiente es una regla para asignar la clasificación ingenieril basada en las funciones de vulnerabilidad de Antofagasta.

**IF** (muro = Muro de albañilería confinada AND techo = Losa aligerada horizontal OR techo = Losa aligerada inclinada AND Num. Pisos=>4)  
**THEN** (Tipo de edificación = RM mr)

La principal fuente de datos para el desarrollo del inventario de las edificaciones de la ciudad de Moquegua fue proporcionada por la Municipalidad Provincial de Moquegua. Dicha base de datos registra 13766 lotes actualizados hasta el año 2001, este número incluye viviendas particulares, lotes vacíos, colegios, hospitales, comercio entre otros.

La base gráfica georeferenciada, también proporcionada por la Municipalidad de Provincial de Moquegua, tiene registrada 10215 lotes. Durante el proceso de unir la base de datos con la base gráfica dentro del entorno SIG, 9639 lotes fueron conectados, es decir poseen una base de datos espacial, quedando 576 con base gráfica pero sin base de datos. El Anexo E muestra el número de lotes enlazados al SIG de acuerdo al centro poblado. Además 1830 lotes no tienen información que describa a las edificaciones existentes dentro del lote, lo que hace suponer que estos lotes están sin construir y por lo tanto sólo 7809 lotes han sido evaluados.

En muchos casos dentro de un mismo lote existe más de una edificación, con lo cual se llegaron a determinar 10173 edificaciones, como se muestra en la Tabla 4-15. De acuerdo a la estimación realizada en el Capítulo 2, la ciudad de Moquegua tenía 12268 viviendas particulares para el año 2001. Además las

viviendas particulares conforman casi todas las edificaciones existentes en la ciudad, por lo tanto un 80% de las edificaciones han sido analizadas en el presente estudio.

La Figura 4-2 muestra el número de edificaciones evaluadas según centro poblado. Se observa que el PP.JJ San Francisco y el centro poblado Enace A de San Antonio tienen el mayor número de edificaciones evaluadas con 2690 y 1830 respectivamente, sin embargo la base de datos registra un número mayor de lotes para el Cercado. Esto es debido a que un gran número de lotes del Cercado no tiene base gráfica.

**Tabla 4-15:** Distribución de los tipos de edificaciones según centro poblado

CENTRO POBLADO	TIPO DE EDIFICACIÓN						SUB TOTAL
	PC	MR lr	UMR	ADOBE	ACONS	MR mr	
ASOC. CAPILLUNE		3					3
ASOC. VILLA SAN ANTONIO		13	1		1		15
ASOC. PEDRO HUILCA T.		75		2			77
CPM. LOS ANGELES		29	3	116	2		150
ASOC. JOSE OLAYA		68					68
ASOC. MAGISTERIAL		144		1			145
URB. LOPEZ ALBUJAR II		300	2	6	1		309
PROMUVI - SAN ANTONIO		190		240	3		433
URB. LOPEZ ALBUJAR I	1	275	1	2		2	281
ENACE B SAN ANTONIO		219	3	240	1		463
PP.JJ EL SIGLO		253		627			880
PP.JJ MARISCAL NIETO	1	293	3	1205	5		1507
ENACE A SAN ANTONIO		701	177	948	4		1830
PP.JJ SAN FRANCISCO		941	17	1729		3	2690
CERCADO	5	508	17	771	5	16	1322
<b>TOTAL</b>	<b>7</b>	<b>4012</b>	<b>224</b>	<b>5887</b>	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>10173</b>

La Figura 4-3 muestra la distribución de los diferentes tipos de edificaciones, según los principales centros poblados. Esta figura nos muestra que la ciudad está constituida principalmente por edificaciones de adobe (57.87%) y por mampostería confinada de 1 a 3 pisos (39.44%) y que las pocas edificaciones de más de 3 pisos están ubicadas en el Cercado de Moquegua.

La Lámina L-42 muestra la distribución de los diferentes tipos de edificaciones en la Ciudad de Moquegua.

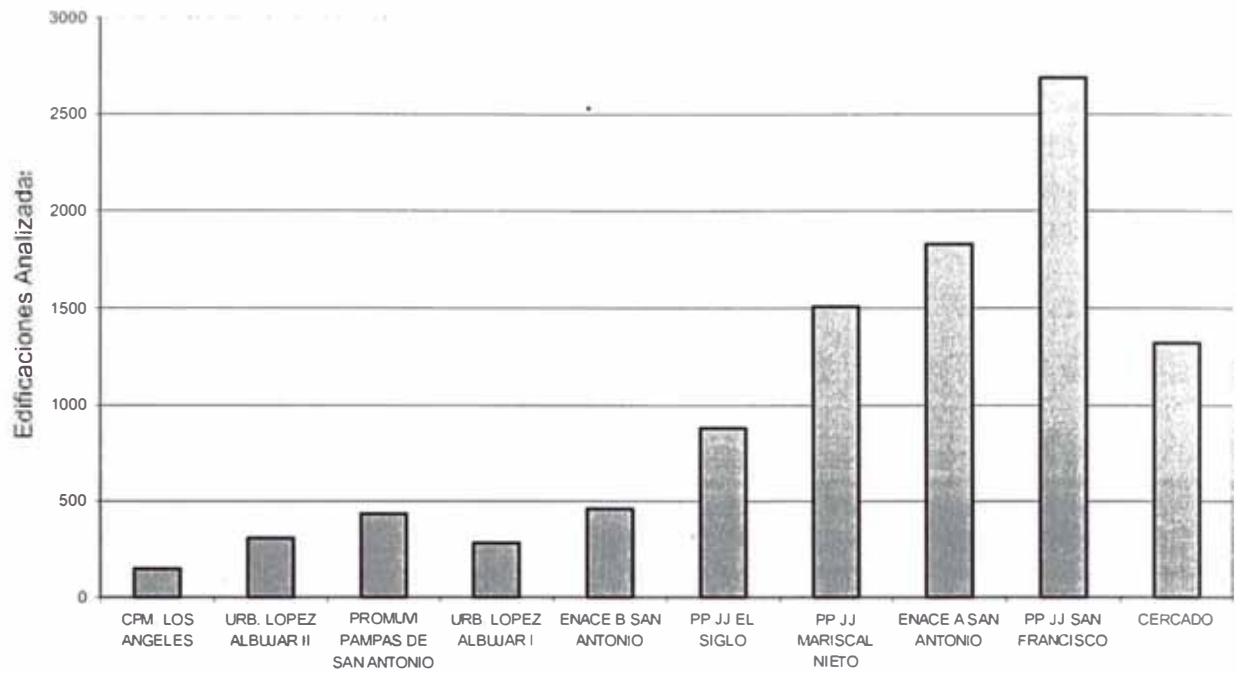


Figura 4-2: Número de edificaciones analizadas según centro poblado

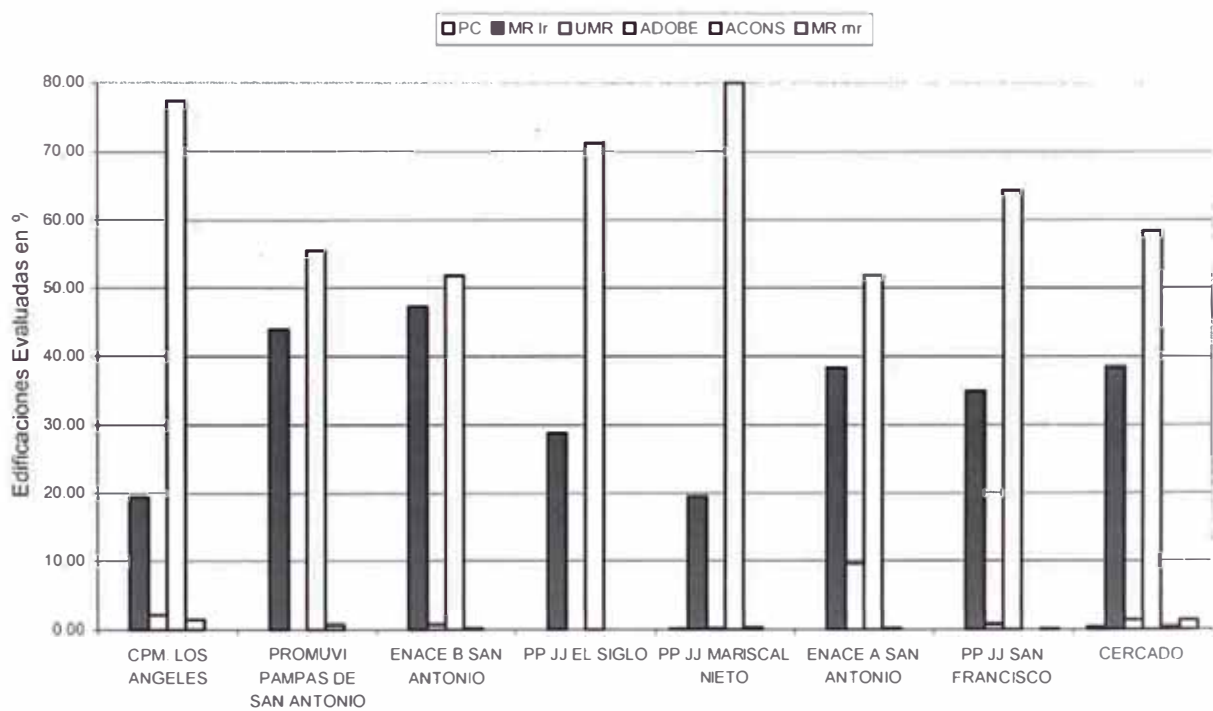


Figura 4-3: Distribución de los tipos de edificación, según principales centros poblados

## 4.6 Estimación de Daños Para Sismos Escenarios

Métodos para estimar la distribución regional de daños por terremotos a edificaciones, puentes, presas, sistemas de servicios, y otras estructuras hechas por el hombre han sido objeto de extensas investigaciones sobre las décadas pasadas (Rojahn, 1993). La evaluación de daños para una región depende típicamente de tres factores: (1) el nivel de peligro sísmico en la región, incluyendo los efectos de condiciones de sitio; (2) La distribución las edificaciones en la región, de acuerdo a la clasificación ingenieril para terremotos; y (3) la definición de funciones que relacionan los niveles de daño esperado para diferentes intensidades de peligro sísmico. La estimación del peligro sísmico regional, incluyendo efectos locales o de sitio, fue discutida en el Capítulo 3, y en las secciones previas de este capítulo se definieron los métodos de clasificación estructural de las edificaciones y el desarrollo de un inventario para describir la distribución regional de las edificaciones. En las siguientes líneas se presentará un resumen de los procedimientos para estimar la distribución de daño regional en el entorno SIG.

Para la ilustración de la estimación regional de daño dentro del entorno SIG, se usarán las curvas de vulnerabilidad de Antofagasta, en términos de proporción de daños. Aunque estas curvas son una simple representación de la relación de movimiento-daño, la metodología intenta ser suficientemente general que permita el uso de relaciones más complejas de movimiento-daño.

El peligro sísmico regional en esta investigación está cuantificado en términos de intensidad, en la escala de Mercalli Modificada. Aunque esta escala es muy subjetiva, generalmente ha sido utilizada en relaciones de movimiento-daño en la mayor parte de estudios de pérdidas por terremotos.

La definición de los estados o niveles de daños de acuerdo al daño sufrido por una determinada estructura es de suma importancia para, posteriormente, poder estimar daños de modo cualitativo o subjetivo. La Tabla 4-16 muestra la descripción de los niveles de daños adoptada en el presente estudio.

**Tabla 4-16:** Descripción de los niveles de daños adoptados en el presente estudio

DESCRIPCIÓN	NIVELES DE DAÑO	RANGO DE DAÑO (%)
Sin daño	Ninguno	0
Daño mínimo que no requiere reparación	Leve	0-1
Daño menor localizado en algunos elementos que generalmente no requiere reparación	Ligero	1-10
Daño menor localizado en muchos elementos que deben ser reparados	Moderado	10-30
Daño extensivo que requiere reparaciones mayores	Fuerte	30-55
Daño grave generalizado que puede significar su demolición	Severo	55-100
Destrucción total ó colapso	Destrucción	100

#### 4.6.1 Estimación de Daños en la Ciudad de Moquegua Dentro del Entorno SIG

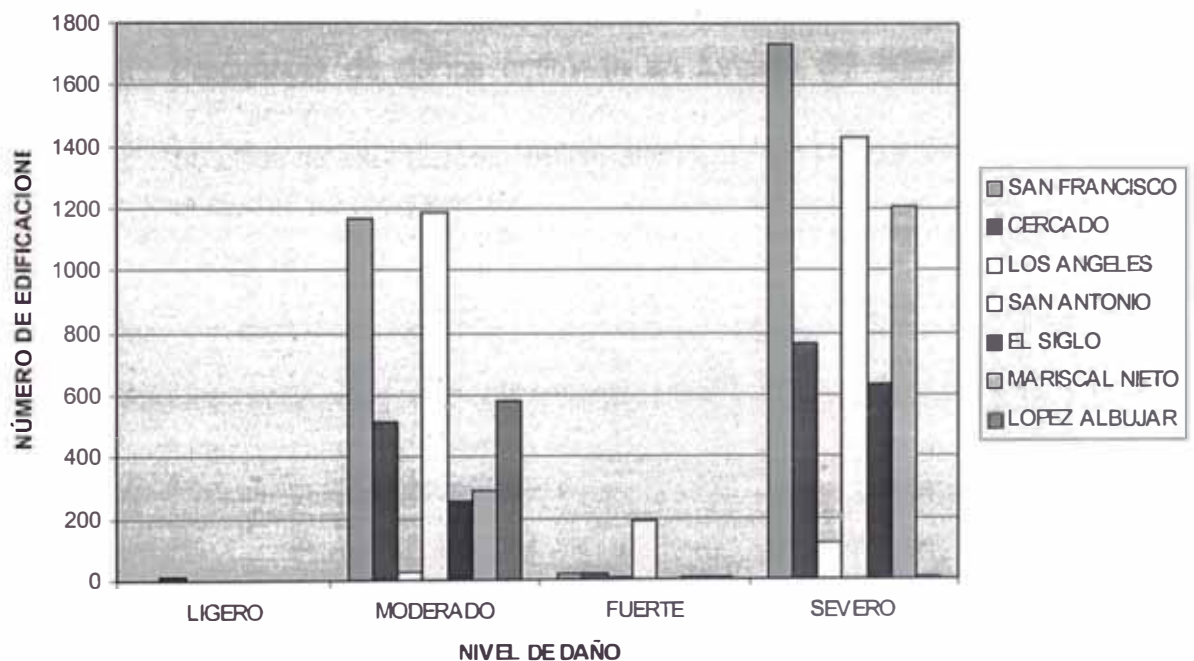
La capacidad de almacenamiento y análisis de datos espaciales de un sistema de información geográfica lo convierte en un entorno ideal para llevar a cabo una estimación de daño regional. El Capítulo 3 analizó el peligro sísmico incluyendo el principal efecto de sitio (amplificación sísmica) usando la tecnología SIG, produciendo la distribución de las intensidades en la escala MM a lo largo de la ciudad de Moquegua para los tres sismos escenarios considerados. Para la ilustración de la estimación del daño regional basado en tecnologías SIG, descrita en esta sección, solo será necesario incluir tres pasos, los cuales se repetirán para cada edificación existente dentro del inventario de edificaciones:

- Determinar la amenaza sísmica para la edificación de acuerdo a su ubicación geográfica.
- Determinar el tipo de estructura de la edificación, basado en las curvas de vulnerabilidad adoptadas, que en este caso son las de Antofagasta.
- Finalmente el daño promedio de la edificación es obtenido de la curva de vulnerabilidad correspondiente al tipo de estructura de la edificación.

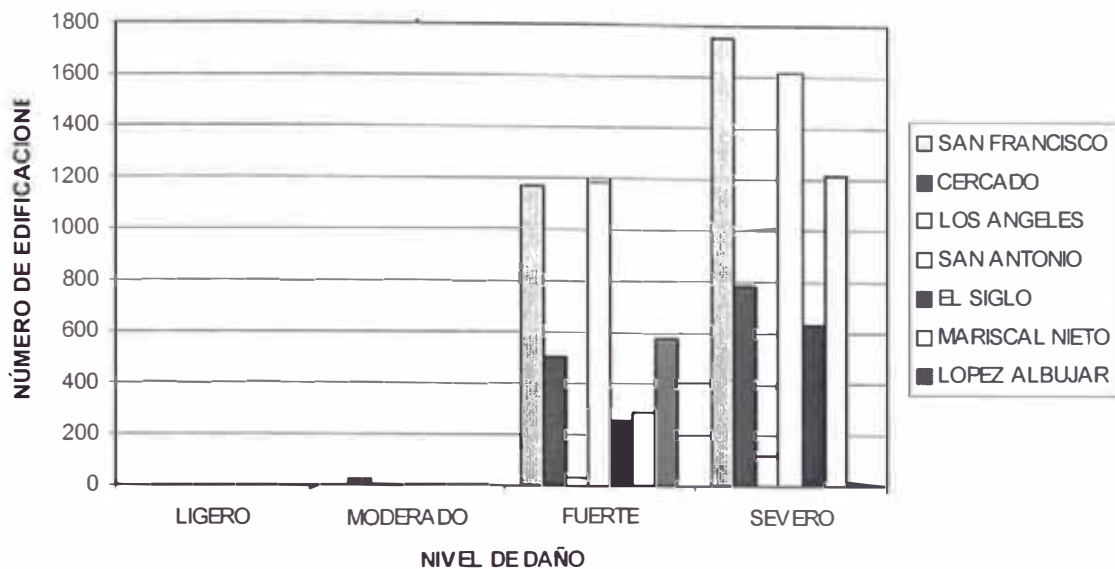
Como se puede observar el procedimiento de análisis para estimar daños involucra superponer el mapa de amenazas (Lámina L-35)

con el mapa de inventario de las edificaciones (Lámina L-42) para poder asignar la amenaza sísmica a cada edificación del inventario. Como resultado de esta superposición obtenemos los mapas de las Láminas L-43, L-44 y L-45, los cuales muestran la distribución de los daños en la ciudad de Moquegua tanto para el sismo del 2001 como para los sismos escenarios con un periodo de retorno de 475 años y con un periodo de retorno de 950 años respectivamente.

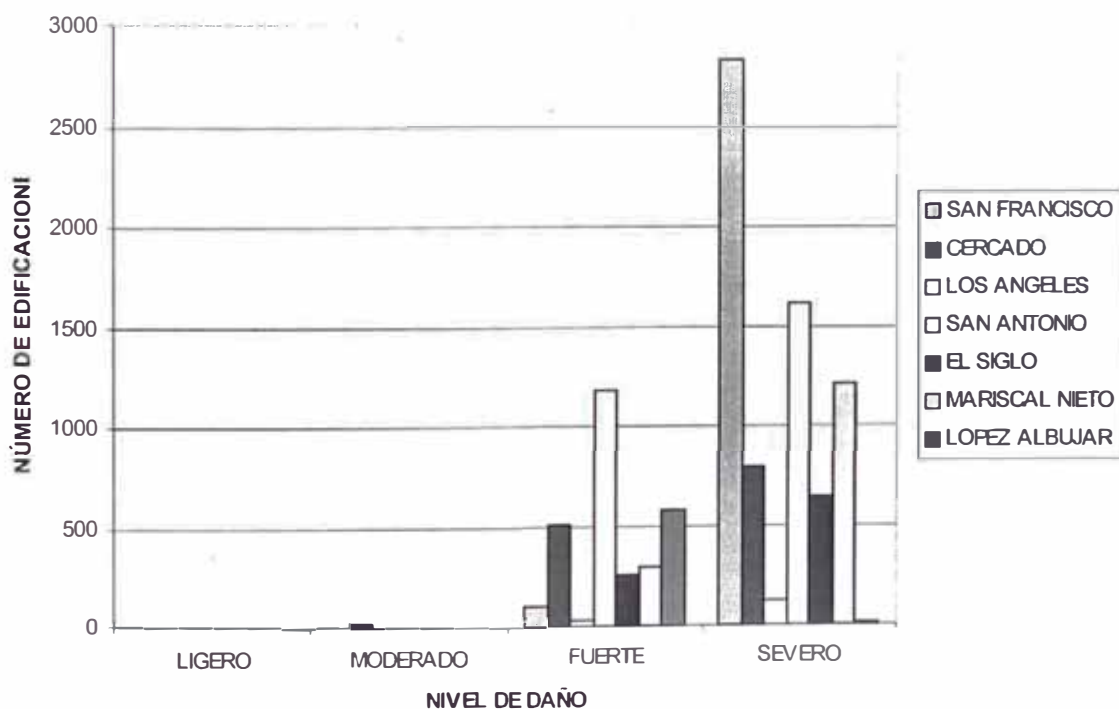
Las Figuras 4-4, 4-5, 4-6 nos permiten identificar que zonas de la ciudad presentarían mayores daños dada la ocurrencia de los tres sismos escenarios analizados en este trabajo. Los valores correspondientes a estas figuras se pueden observar en las Tablas 4-17, 4-18 y 4-19 respectivamente.



**Figura 4-4:** Frecuencia de daños estimada en función del número de edificaciones por centro poblado, para el sismo escenario del 23 Junio del 2001, al 80% de las edificaciones de la ciudad de Moquegua



**Figura 4-5:** Frecuencia de daños estimada en función del número de edificaciones por centro poblado, para un sismo escenario de 50 años de exposición sísmica, al 80% de las edificaciones de la ciudad de Moquegua



**Figura 4-6:** Frecuencia de daños estimada en función del número de edificaciones por centro poblado, para un sismo escenario de 100 años de exposición sísmica, al 80% de las edificaciones de la ciudad de Moquegua



**Tabla 4-17:** Número estimado de edificaciones, de acuerdo a su nivel de daño, para un sismo escenario similar al del 23 de Junio del 2001, según centro poblado, al 80% de las edificaciones de la ciudad de Moquegua

CENTRO POBLADO	NIVEL DE DAÑO				PARCIAL
	LIGERO	MODERADO	FUERTE	SEVERO	
SAN FRANCISCO	3	1170	19	1734	2926
CERCADO	16	513	22	765	1316
LOS ANGELES	0	29	5	116	150
SAN ANTONIO	0	1185	187	1427	2799
EL SIGLO	0	255	0	631	886
MARISCAL NIETO	0	292	8	1206	1506
LOPEZ ALBUJAR	2	577	4	7	590
<b>TOTAL</b>	<b>21</b>	<b>4021</b>	<b>245</b>	<b>5886</b>	<b>10173</b>

**Tabla 4-18:** Número estimado de edificaciones, de acuerdo a su nivel de daño, para un sismo escenario de 50 años de exposición sísmica, según centro poblado, al 80% de las edificaciones de la ciudad de Moquegua

CENTRO POBLADO	NIVEL DE DAÑO			PARCIAL
	MODERADO	FUERTE	SEVERO	
SAN FRANCISCO	3	1170	1753	2926
CERCADO	22	507	787	1316
LOS ANGELES	0	29	121	150
SAN ANTONIO	0	1185	1614	2799
EL SIGLO	0	255	631	886
MARISCAL NIETO	0	292	1214	1506
LOPEZ ALBUJAR	3	576	11	590
<b>TOTAL</b>	<b>28</b>	<b>4014</b>	<b>6131</b>	<b>10173</b>

**Tabla 4-19:** Número estimado de edificaciones, de acuerdo a su nivel de daño, para un sismo escenario de 100 años de exposición sísmica, según centro poblado, al 80% de las edificaciones de la ciudad de Moquegua

CENTRO POBLADO	NIVEL DE DAÑO			PARCIAL
	MODERADO	FUERTE	SEVERO	
SAN FRANCISCO	3	98	2825	2926
CERCADO	22	507	787	1316
LOS ANGELES	0	29	121	150
SAN ANTONIO	0	1185	1614	2799
EL SIGLO	0	255	631	886
MARISCAL NIETO	0	292	1214	1506
LOPEZ ALBUJAR	3	576	11	590
<b>TOTAL</b>	<b>28</b>	<b>2942</b>	<b>7201</b>	<b>10173</b>

Antes de hacer la interpretación de estos resultados se debe mencionar que la urbanización López Albuja fue considerada como una zona diferente a San Antonio principalmente para mostrar la diferencia en los daños existentes entre las edificaciones de estas dos zonas. Así mismo, se ha considerado que el CPM San Francisco involucra también las asociaciones José Olaya, Magisterial, Capillune y Villa San Antonio.

Los resultados muestran que los centros poblados San Francisco, Mariscal Nieto y San Antonio (menos la Urb. López Albuja) tendrían una mayor cantidad de edificaciones con daño severo tal como se ve en las Figuras 4-4, 4-5 y 4-6. Esto es debido a: la densidad de edificaciones, la alta vulnerabilidad de éstas, y el alto nivel de peligro sísmico, principalmente en la zona de San Francisco. En la Figura 4-6 se puede observar que el 96.5% de las edificaciones de la zona de San Francisco estarían en un nivel de daño severo para el sismo escenario de 100 años de exposición sísmica, lo cual es preocupante.

En el Cercado de Moquegua, los daños estarían repartidos entre moderado (39%) y severo (58%), para el caso de un sismo con similares características al del 2001 y entre moderado (40%) y severo (60%), para el PP.JJ. San Francisco en igual condición de amenaza. La evaluación de daños al 80% del total de las edificaciones de la ciudad de Moquegua, realizada después del sismo del 23 de junio del 2001 por la UNSA-INDECI, indica que el

47% y 43% de las viviendas ubicadas en el Cercado y en el PP.JJ. San Francisco respectivamente, colapsaron.

Tanto la estimación de daños realizado durante este proyecto, como la evaluación de daños realizado por la UNSA-INDECI (2001), analizaron una muestra que representa el 80% de las edificaciones existentes. El termino "severo" usado en la estimación de daños y el término "colapsado" usado durante la evaluación de daños, están representando un mismo nivel de daño. Siendo entonces comparables ambos términos se concluye que los daños estimados están resultando mayores que los daños observados, tal como se puede observar en el párrafo anterior. La adaptación de las curvas de vulnerabilidad de Antofagasta a las edificaciones de la Ciudad de Moquegua sería el principal motivo de esta diferencia.

La mayoría de los países incluyendo los sudamericanos han elaborado sus propias matrices de daños y no solo a nivel de país sino a nivel de ciudades importantes. Por lo expuesto líneas atrás y en el párrafo anterior, se hace indispensable la elaboración de una matriz de daños para el Perú y de ser posible para las principales ciudades, de modo que éstas nos permitan estimar el riesgo con mayor aproximación.

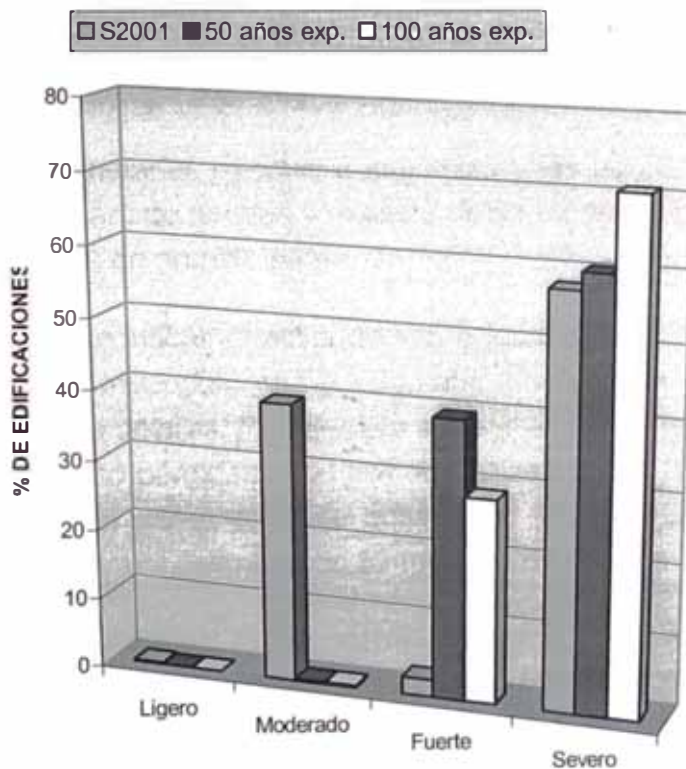
También es indispensable mejorar las metodologías actuales, clasificando a un mismo tipo de edificación (por ejemplo: mampostería confinada) de acuerdo no sólo a su antigüedad de construcción si no a una serie de parámetros geométricos, mecánicos, dinámicos de la estructura, que son relevantes durante un evento sísmico. Estos tipos de trabajos son llamados "Análisis de vulnerabilidad de segundo nivel de aproximación", que actualmente están siendo desarrollado en países como Colombia y Ecuador, el cual permite ajustar una matriz de daños.

La Tabla 4-20, y la Figura 4-7 muestran el nivel de daños en las edificaciones de Moquegua para los tres sismos escenarios.

De los resultados obtenidos, se estima que la mayor parte de las edificaciones de Moquegua, 57.85% de las edificaciones analizadas, se encontrarían en un estado de daño severo después de un sismo con similares características a la del 2001 y un 39.52% de las edificaciones analizadas se encontrarían en un estado de daño moderado.

**Tabla 4-20:** Número de edificaciones de la ciudad de Moquegua (al 80%) según su nivel de daño, para los tres sismos escenarios.

NIVEL DE DAÑO	S2001	50 AÑOS EXP.	100 AÑOS EXP.
Ninguno	0	0	0
Leve	0	0	0
Ligero	21	0	0
Moderado	4022	28	28
Fuerte	246	4015	2943
Severo	5887	6133	7205
Destrucción	0	0	0



**Figura 4-7:** Frecuencia de daños en función del porcentaje edificaciones analizadas en la ciudad de Moquegua.

Para el caso de un sismo con periodo de retorno de 475 años, se estima que un 60.27% de las edificaciones analizadas estarían dentro del nivel de daño severo y un 39.46% estarían dentro del nivel de daño fuerte siendo éstas las más representativas, y a diferencia del sismo del 2001 el estado de daño moderado prácticamente desaparece.

Para el caso de un sismo con periodo de retorno de 950 años, se estima que un 70.80% de las edificaciones analizadas estarían dentro del nivel de daño severo y un 28.92% estarían dentro del nivel de daño fuerte, notándose un incremento del estado de daño severo.

Fácilmente uno puede ver en la Figura 4.7 que los niveles de daños fuertes y severos se van incrementando para los sismos con 475 y 950 años de periodo de retorno, y por consiguiente es de esperar efectos mucho más catastróficos que los observados durante el sismo del año pasado. Prevenir y mitigar estos efectos tiene que ser entonces una de las principales tareas que deben realizar las autoridades locales y regionales de la Provincia Mariscal Nieto.

#### **4.7 Evaluación del Riesgo Sísmico**

Las pérdidas monetarias directas e indirectas y las pérdidas no monetarias como son el número de heridos y muertos debido a daños por terremoto casi no son estudiados en nuestro país.

Las pérdidas económicas directas debido a los daños por terremoto en las principales áreas metropolitanas puede estar alrededor de varios millones é incluso billones de dólares. Por ejemplo se estima que, el terremoto de Loma Prieta (1989) causó pérdidas económicas directas de 5.9 billones de dólares (ABAG, 1991) y el sismo del 3 de octubre de 1974 en Lima causó daños materiales por un valor estimado de 62 millones de dólares (INDECI).

En el caso de pérdidas no económicas, como heridos y damnificados, también puede ser tan devastador. Desde principios del Siglo XX los mayores terremotos en las regiones sísmicas del mundo han causado más de 1.25 millones de heridos (Agbabian y Chilingarian, 1991). Por ejemplo, en 1988, el terremoto de Armenia causó más de 25 000 heridos y dejó cerca de 500 000 damnificados; el terremoto de Huaraz (1970) causó la muerte de casi todos los habitantes de la ciudad de Yungay, el sismo de Atico del 23 de Junio del 2001 ocasionó en el departamento de Moquegua la muerte de 22 personas, 277 heridos, y 57467 damnificados según la evaluación realizada por el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI).

Estadísticas de pérdidas como los mencionados y la poca investigación en la gestión del riesgo, enfatizan la importancia del análisis del peligro y riesgo sísmico regional para estimar pérdidas en terremotos para propósitos orientados al planeamiento de emergencias y la mitigación del peligro.

#### 4.7.1 Estimación de Pérdidas Económicas

Las pérdidas económicas ocasionadas por un terremoto son mayormente debido a: (1) Daño estructural directo, por ejemplo falla de vigas, excesivas deflexiones y normas diferenciales para edificaciones artesanales; y (2) Efectos indirectos, por ejemplo daños a elementos no estructurales y contenidos, limpieza y financiamiento de reparación, y pérdida debido al no funcionamiento del servicio.

Aunque hay varios métodos para estimar las pérdidas debido a daño estructural directo, la mayoría son computados como una función del costo de reemplazar la edificación y el daño estimado para la edificación. Para propósitos de ilustrar la aplicación de la tecnología SIG a la estimación de pérdida regional, una simple fórmula para calcular las pérdidas directas de una edificación será usada y esta dada por:

$$E[\text{pérdida}] = E[\text{PD}] \times (\text{costo de la edificación}) \quad (4.6)$$

Donde:

$E[\text{PD}] =$  Proporción de daño esperado para un tipo de edificación

Como se vio en la sección 4.4.1 el concepto de proporción de daños no refleja exactamente la relación de pérdida económica directa de la edificación, como si lo hace el factor de daño. Por lo que sería mejor usar este último dentro de la fórmula 4.6, sin embargo debido a la falta de curvas de vulnerabilidad expresadas en términos de factor de daño similares a la del ATC-36 ó matrices de daños que expresen el daño como una función de pérdidas financieras similares a las MPDs del ATC-13, este parámetro no fue usado.

Ambos conceptos, proporción y factor de daño, intentan cuantificar un mismo parámetro. Así en términos globales ó regionales, que por cierto es el objetivo del presente estudio, ambas definiciones expresan lo mismo, por lo que son comparables, tal como fue usada por Sauter en "Damage Prediction for Earthquake Insurance", 1979 para estimar pérdidas.

No obstante, se espera que en trabajos futuros relacionados con la gestión del riesgo se tenga como herramienta curvas de

vulnerabilidad para las principales ciudades de nuestro país, los cuales deben estar expresadas en términos de factor de daño, cosa que en la actualidad no existe.

El costo de una edificación es típicamente calculada como el producto del área y el costo de la edificación por unidad de área. El costo de una edificación generalmente varía dependiendo del tipo de material predominante, del tipo de acabados, del uso ó de la función social de la edificación y frecuentemente varía para diferentes localidades.

Teniendo en cuenta todos estos parámetros, en el presente estudio se ha usado la metodología del Consejo Nacional de Tasaciones, CONATA, para evaluar el costo de los diferentes tipos de edificaciones. La información necesaria para aplicar esta metodología incluye datos sobre tipo de: muros, techos, pisos, puertas y ventanas, revestimientos, baños, instalaciones eléctricas y sanitarias, uso de la edificación, material predominante, estado de conservación. Todas estas características están codificadas de acuerdo a un cuadro de valores unitarios oficiales para edificaciones, el cual es emitido por CONATA cada año.

La mayoría de las municipalidades realizan su catastro de acuerdo al cuadro de valores unitarios emitido por CONATA. La Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto describe los predios de acuerdo a estos cuadros, principalmente con el objetivo de cobrar el autovalúo correspondiente, por lo que fue factible cuantificar el valor de la edificación.

Las pérdidas monetarias indirectas son mucho más difíciles de cuantificar que las pérdidas debido a daños estructurales directos. Frecuentemente a los contenidos y componentes no estructurales de una edificación se les asigna un valor monetario que es un porcentaje del valor total de la edificación basado en el uso o función social del predio. El factor de daño de los contenidos y componentes algunas veces se asume igual al de la edificación ó es calculado a través del uso de curvas de vulnerabilidad desarrolladas específicamente para los contenidos y componentes. Otras pérdidas monetarias indirectas generalmente son debidas al financiamiento de la reparación, limpieza y pérdida del uso del negocio.

En el presente estudio se estimarán pérdidas económicas directas, es decir daños estructurales, y en lo referente a las pérdidas indirectas, solo los daños en componentes no estructurales. Esto es gracias a que la descripción del predio incluye datos referidos a sus instalaciones de agua y luz, así como también tipos de acabados, puertas, ventanas y el uso de la edificación. Obviamente se está asumiendo que el factor de daño de los contenidos y los componentes son similares al de la estructura.

#### 4.7.2 Estimación del Número de Víctimas

Las pérdidas no monetarias por terremoto generalmente incluyen muertos, heridos, desempleados y damnificados. Las estadísticas de víctimas por terremotos en nuestro país son muy limitadas y los modelos de estimación del número de víctimas por terremotos son desarrollados frecuentemente de acuerdo a la opinión de expertos, tal como el modelo sugerido por el ATC-13 (1985). Aunque este modelo fue desarrollado para el estado de California en los EE.UU. y ha sido criticado por ser demasiado simple, éste provee una metodología para estimar el número de muertos y heridos de una región. La Tabla 4-21 ilustra los resultados de dicho modelo, mostrando los estimados de muertos y heridos como una función del estado ó nivel de daño. Esta tabla generalmente es usada en conjunto con una tabla de proporción de ocupantes de día y noche para un determinado tipo edificación de acuerdo a su uso ó función social.

**Tabla 4-21:** Estimación del número de víctimas debido a terremotos (ATC-13, 1985)

NIVEL DE DAÑO	Fracción de heridos leves	Fracción de heridos graves	Fracción de muertos
1	0	0	0
2	3/100 000	1/250 000	1/1 000 000
3	3/10 000	1/25 000	1/100 000
4	3/1 000	1/ 2 500	1/10 000
5	3/100	1/250	1/1 000
6	3/10	1/25	1/100
7	2/5	2/5	1/5

Modelos para otros tipos de pérdidas no monetarias por terremotos, tal como damnificados y desempleados, no han sido totalmente desarrollados, pues estos efectos dependen de varios factores, los cuales son difíciles de cuantificar. En el presente estudio solo se



estimará el número de víctimas, pero es posible la inclusión futura de otros modelos socio-económicos en el análisis regional basado en SIG.

#### **4.7.3 Riesgo Sísmico de la Ciudad de Moquegua Dentro del Entorno SIG**

La distribución espacial de pérdidas por terremotos en una región es frecuentemente usada para propósitos tales como asignación de recursos, mitigación de desastres, así como también para las entidades aseguradoras.

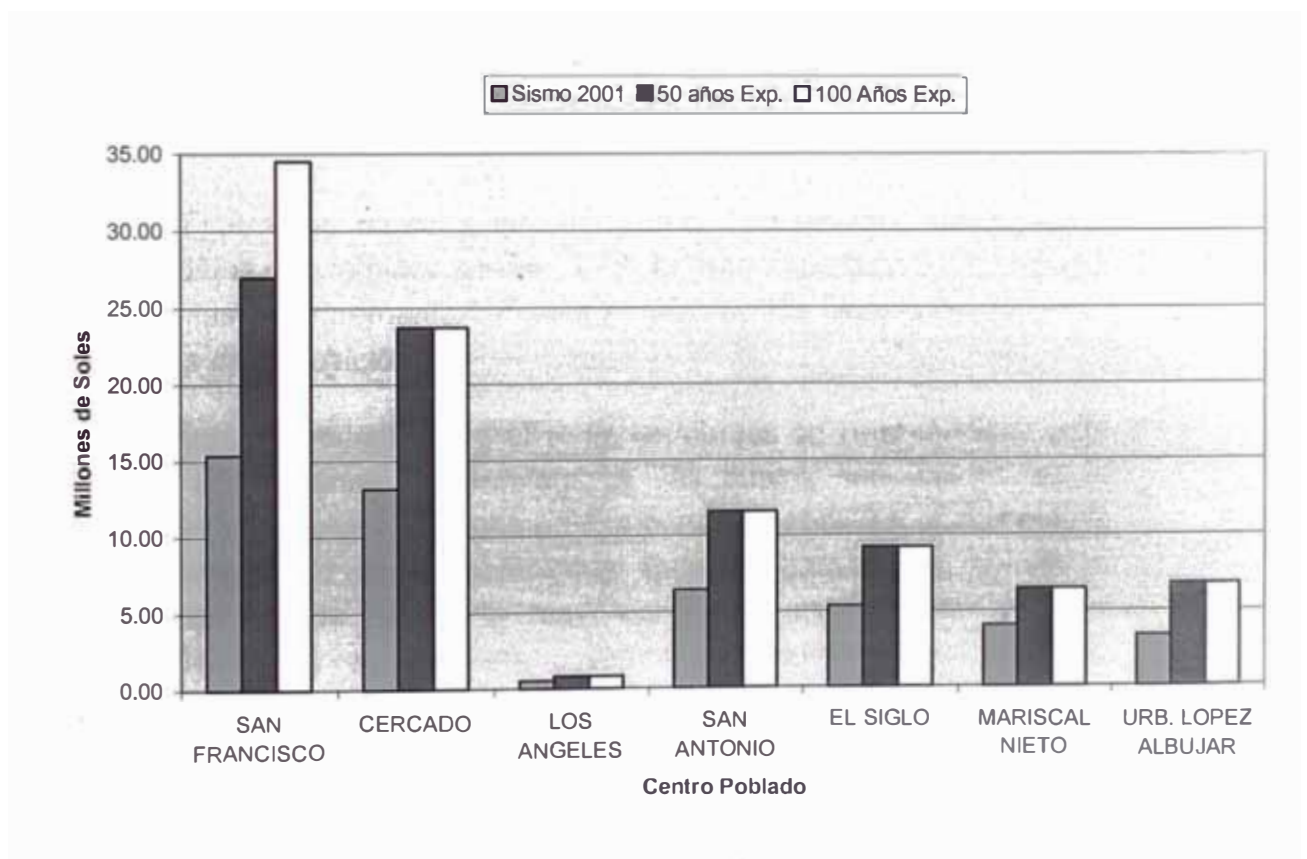
Los sistemas de información geográfica proveen una poderosa herramienta para almacenar y manipular grandes cantidades de información, los cuales son requeridos para la estimación de pérdidas regionales debido a sismos.

El cómputo de las pérdidas monetarias debido a daños estructurales se hizo de acuerdo a la Ecuación 4.6, la cual fue discutida la Sección 4.7.1. El cálculo del valor de la edificación se hizo en base a la metodología de CONATA y el valor del daño promedio se obtuvo a partir de la estimación de daños expuestos en la Sección 4.6.1, usando las curvas de vulnerabilidad de Antofagasta. Así pues, se superpusieron los mapas de distribución de daños para los tres sismos escenarios mostrados en las Láminas L-43, L-44, L-45, con el mapa de valor de las edificaciones que se muestra en la Lámina L-46, generándose los mapas de distribución de pérdidas económicas para el sismo de Atico del 23 de Junio del 2001, para el sismo de 50 años de exposición sísmica y para el sismo de 100 años de exposición sísmica. Las Láminas L-47, L-48, L-49 muestran los mapas de distribución de pérdidas económicas directas para los tres sismos escenarios propuestos.

El Anexo F muestra algunas de las tablas que son emitidas por CONATA y que fueron usadas para el cálculo del valor de las edificaciones. La Figura 4-8 y la Tabla 4-22 muestran las pérdidas estimadas para los tres sismos escenarios, según los centros poblados. Aunque no se pudo conseguir información de estimados de pérdidas después del sismo del 2001, algunos ingenieros de la ciudad opinan que este valor está alrededor de los 70 millones de soles. Dicha estimación esta basada en los préstamos que está efectuando el estado a los propietarios afectados a través de

entidades internacionales. De acuerdo a estas opiniones podríamos decir que el valor estimado es relativamente bajo.

Como se explicó durante todo este capítulo, el inventario de edificaciones no está elaborado en su totalidad (80%), además el distrito de Samegua no pertenece a dicho inventario pero los préstamos también involucran a este distrito. Otra observación importante es que los préstamos están clasificados dependiendo del poder adquisitivo del afectado, por lo que sería mejor estimar las pérdidas con costos de reemplazo en vez de costos de la edificación, tal como lo propone el ATC-36. Sin embargo, el costo de reemplazo no se utilizó en este caso debido a que éste requiere un estudio socioeconómico detallado. El costo de reemplazo para el caso de la ciudad de Moquegua parecería no ser tan significativa debida a la poca actividad comercial que existe en esta ciudad y a la poca diversidad social dentro de la misma.



**Figura 4-8:** Pérdidas estimadas para los tres sismos escenarios según centro poblado, al 80% de las edificaciones de la ciudad de Moquegua

**Tabla 4-22:** Pérdidas estimadas para los tres sismos escenarios al 80% de las edificaciones de la ciudad de Moquegua

<b>Centro Poblado</b>	<b>Sismo 2001</b>	<b>50 años Exp.</b>	<b>100 Años Exp.</b>
SAN FRANCISCO	15,372,793.54	26,964,969.67	34,481,977.32
CERCADO	13,151,993.17	23,705,690.81	23,705,690.81
LOS ANGELES	507,346.08	795,289.83	795,289.83
SAN ANTONIO	6,419,580.38	11,576,578.74	11,576,578.74
EL SIGLO	5,347,063.28	9,221,149.53	9,221,149.53
MARISCAL NIETO	4,007,549.98	6,445,881.51	6,445,881.51
URB. LOPEZ ALBUJAR	3,307,798.90	6,721,003.96	6,721,003.96
<b>TOTAL</b>	<b>S/. 48,114,125.33</b>	<b>S/. 85,430,564.05</b>	<b>S/. 92,947,571.70</b>

Pero como no se tiene la certeza de un valor determinado para las pérdidas económicas debido al sismo del 23/06/2001, no se puede hacer una comparación exacta.

La Figura 4-8 muestra que las zonas que tendrían las mayores pérdidas económicas serían El PP.JJ. San Francisco y El Cercado, y éstas se incrementarían para el caso de los sismos de 50 y 100 años de exposición.

El Anexo B muestra la gráfica de las curvas de vulnerabilidad para las edificaciones de Antofagasta, las cuales son usadas en el presente estudio. En Dicha gráfica podemos observar claramente la vulnerabilidad de los diferentes tipos de estructuras, siendo la edificación de adobe la mas vulnerable en contraste con las edificaciones de mampostería reforzada de mediana altura (mas de tres pisos). De acuerdo a la evaluación de los fenómenos geodinámicos se determinó que tanto la Urb. López Albuja y sus colindantes están expuestas a la misma amenaza sísmica. Sin embargo los mapas de distribución de daños muestran que la Urb. López Albuja experimenta menos daños que sus vecinos durante los tres sismos escenarios, lo cual indica que esta urbanización es menos vulnerable. Las zonas colindantes con la Urb. López Albuja, los cuales fueron agrupados como San Antonio, tienen casi cuatro veces la cantidad de viviendas existentes en dicha urbanización (ver tabla 4.17). Sin embargo las pérdidas estimadas

en esta urbanización representan casi la mitad de las pérdidas estimadas para la zona denominada San Antonio (ver tabal 4.22). El costo de reparación, el número de pisos y el tipo de acabado de las edificaciones estarían incidiendo para que las pérdidas económicas directas en la zona de López Albuja se incrementen.

Como conclusión se podría decir que una zona de baja vulnerabilidad estructural, no conlleva a que las pérdidas económicas directas también sean bajas, a menos que dicha edificación este diseñada de modo que garantice también la baja vulnerabilidad no estructural y funcional (Tabiques, acabados y contenidos dentro de una vivienda). Esta zona sin embargo brinda mayor seguridad a las personas que las habitan.

Para el caso del estimado del número de víctimas el abanico de escenarios es más amplio, pues un sismo podría ocurrir en cualquier momento: en un día particular, en un feriado, durante el día, durante la noche, haciendo que la proporción de víctimas sea menor o mayor de acuerdo al momento del evento. El presente estudio solo evaluará el caso en que el sismo suceda durante el día, debido a que no se tiene estadísticas de ocupación durante los otros escenarios.

Tampoco hay estadísticas de ocupación para edificaciones cuyo uso sea diferente al de una vivienda. No obstante la mayoría de las edificaciones de la ciudad de Moquegua son predios cuyo uso primordial es la de una vivienda particular, por lo tanto una primera aproximación para la estimación de víctimas sería la de modelar la ciudad asumiendo que todas las edificaciones son usadas como vivienda particular.

De acuerdo al censo de 1993 realizada por el INEI, expuesta en este capítulo, el número de ocupantes para una casa independiente durante el día es de 4.2 habitantes / vivienda. Sin embargo esta estadística no describe la geometría de una casa independiente, por lo que se ha considerado que dicha vivienda sea de un piso con un área de 140 m<sup>2</sup>.

Seguidamente se calcula el número de habitantes por cada edificación basada en la estadística de ocupación y el área del predio, pudiendo generarse un mapa donde se indica el número de habitantes por vivienda. Sin embargo no se muestra esta lámina,

debido a las suposiciones hechas para alcanzar este objetivo. Este dato debe ser tratado como un resultado intermedio.

Finalmente superponiendo el mapa de distribución de daños para los tres sismos escenarios (Láminas L-43, L-44, L-45) con el mapa del número de habitantes y haciendo uso de la Tabla 4-11 se ha estimado el número de heridos y muertos para los tres sismos escenarios cuyos resultados se pueden observar en la Tabla 4-23. Hay que mencionar que el número de heridos y muertos es evaluado para una vivienda individualmente.

El INDECI indica que el sismo del 23 de Junio ocasionó en el Departamento de Moquegua la muerte de 22 personas, reportándose además 277 heridos. Estas cifras comparadas con las obtenidas en el presente análisis, de 15 muertos y 277 heridos graves, reflejan una aproximación aceptable. Sin embargo como fue mencionado en párrafos anteriores, el estimado de pérdidas económicas posiblemente está por debajo de lo real; por lo tanto, es necesario completar el inventario de edificaciones poder hacer comparaciones reales.

**Tabla 4-23:** Número de víctimas según sismo escenario.

<b>Víctima</b>	<b>Sismo 2001</b>	<b>50 Años Exp.</b>	<b>100 Años Exp.</b>
Heridos Leves	10183	10765	12842
Heridos Graves	277	298	382
Muertos	15	17	24
<b>TOTAL</b>	<b>10475</b>	<b>11080</b>	<b>13248</b>

Todos estos resultados nos hace dar cuenta de la necesidad de adaptar los métodos y modelos estudiados en otros países a nuestra realidad, como también en un futuro próximo refinar estas metodologías y modelos.

Los valores resultantes, tales como, S/. 14,643.59 en pérdidas para el caso de una vivienda cualquiera, 0.028 heridos graves, no deben ser usados para un análisis específico de una edificación. Los modelos de donde los valores de pérdidas son calculados, han sido simplificados para que pueda ser aplicable a una estimación de daños y pérdidas regionales. Los valores son computados por cada edificación para ilustrar la efectividad de la tecnología de los sistemas de información geográfica SIG, es decir mostrar su capacidad de almacenar, manipular y visualizar la información espacial envuelta en un análisis de riesgo y peligro sísmico regional.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

El primer objetivo de esta investigación fue la aplicación de la metodología propuesta en el ATC-36, el cual analiza el riesgo sísmico de una región usando Sistemas de Información Geográfica, y para lo cual la ciudad de Moquegua fue la región en estudio.

Los resultados muestran la efectividad de los Sistemas de Información Geográfica para el análisis de riesgo sísmico de una región y que fácilmente podría amoldarse a grandes urbes. Numerosos mapas y tablas fueron incluidos en los capítulos 3 y 4, mostrando los diferentes tipos de datos tabulares y espaciales que son almacenados, manipulados, y visualizados en el análisis.

La aceleración pico registrado en la ciudad de Moquegua durante el sismo del 23/06/2001 a nivel de la superficie de la ciudad fue de 0.29g y a nivel de basamento rocoso sería de 0.21g. Para el caso de un sismo con periodo de retorno de 475 años, la aceleración pico en basamento rocoso sería de 0.41g y para un sismo con un periodo de retorno de 950 años este valor sería de 0.51g, ambos con una probabilidad de excedencia del 10%.

Los factores de amplificación sísmica obtenidos para periodos cortos muestran que la zona de San Francisco tiene los valores más altos de la ciudad entre 2.2 y 2.6. Asimismo la zona de expansión urbana (Chen Chen) presenta valores entre 1.6 y 2.2 al igual que una parte de San Antonio, por lo que ambos están expuestos a un mismo nivel de peligro.

La relación de intensidad – aceleración máxima de Saragoni(1982) fue usada para estimar la intensidad sísmica en la zona de estudio. Se ha estimado que el sismo del 23/06/2001 habría alcanzado una intensidad de VIII MM en la ciudad de Moquegua, Valor que resulta ser un poco más alta que la obtenida por el IGP (VII MM). Aunque hay una cierta diferencia con lo estimado por el IGP, la relación de Saragoni fue usada para estimar la intensidad sísmica de los otros dos sismos escenarios, principalmente porque no se encontró otras relaciones que pudieran aproximarse más a la realidad. Además durante el análisis de la evaluación de daños, el cual es explicado en la sección 4.4.4, también se determina que la intensidad durante el sismo del 23/06/2001 en la ciudad de Moquegua fue de VIII MM, obtenido por comparar la matriz de daños de

Moquegua con la de otras regiones (Utah en los EE.UU., Costa Rica, Antofagasta en Chile).

Se estima que la intensidad para un sismo con un periodo de retorno de 475 años sería de IX MM en toda la ciudad de Moquegua. Asimismo se espera una intensidad de X MM para la zona de San Francisco y de IX MM para el resto de la ciudad de Moquegua dado un sismo cuyo periodo de retorno es de 950 años.

Al comparar curvas de vulnerabilidad de tres regiones, los cuales son: Utah, Costa Rica y Antofagasta, se determinó que las curvas de vulnerabilidad de Antofagasta son las que mejor se adecuan a las edificaciones existentes en la ciudad de Moquegua.

Un inventario de edificaciones fue elaborado en base a diferentes fuentes de información, de los cuales la base gráfica y la base de datos proporcionada por la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto han sido las de mayor utilidad. El inventario estructural, de cerca de 10173 edificaciones, fue compilado para la ciudad de Moquegua, representando un 80 % de las edificaciones existentes. Este inventario nos muestra que la ciudad está constituida principalmente por edificaciones de adobe (57.87%) y por edificaciones de mampostería confinada de 1 a 3 pisos (39.44%). También nos muestra que las zonas con mayor número de edificaciones son San Antonio y San Francisco, con 2803 y 2690 respectivamente.

Se estima que la mayor parte de las edificaciones de la ciudad de Moquegua, 57.85% de las edificaciones analizadas, se habrían encontrado en un estado de daño severo después del sismo del 23/06/2001 y un 39.52% de las edificaciones analizadas se habrían encontrado en un estado de daño moderado.

Para el caso de un sismo con periodo de retorno de 475 años, se estima que un 60.27% de las edificaciones analizadas estarían dentro del nivel de daño severo y un 39.46% estarían dentro del nivel de daño fuerte, y la diferencia del sismo del 2001 el estado de daño moderado prácticamente desaparece.

Para el caso de un sismo con periodo de retorno de 950 años, se estima que un 70.80% de las edificaciones analizadas estarían dentro del nivel de daño severo y un 28.92% estarían dentro del nivel de daño fuerte, notándose un incremento del estado de daño severo.

Para un sismo con similares características al del 2001 la estimación de daños indica que en el Cercado de Moquegua, los daños estarían repartidos entre moderados (39%) y severos (58%), y en el PP.JJ. San Francisco los daños estarían repartidos entre moderados (40%) y severos (60%).

La evaluación de daños al 80% del total de las edificaciones de la ciudad de Moquegua, realizada después del sismo del 23 de junio del 2001 por la UNSA-INDECI, indica que el 47% y 43% de las viviendas ubicadas en el Cercado y en el PP.JJ. San Francisco respectivamente, colapsaron.

Considerando que el daño severo usado en la estimación de daños y el estado colapsado usado durante la evaluación de daños representen un mismo nivel de daño, se concluye que los valores estimados son mayores que los reales dado que tanto la estimación y la evaluación están al 80% del total de las edificaciones de la ciudad. Esta diferencia puede deberse a varios factores, más aún cuando la evaluación de daños y la estimación de daños no han sido elaborados con los mismos criterios. Sin embargo es claro que dos son los principales motivos de la diferencia: la relación intensidad – aceleración máxima del terreno que fue utilizada para la estimación de daños, el cual fue la de Saragoni(1982) y la adaptación de las curvas de vulnerabilidad de Antofagasta a las edificaciones de la Ciudad de Moquegua. La falta de aproximación de estas dos herramientas hacen que el modelo predictivo del riesgo arroje estimados mayores que los reales, sin embargo no existen otras que pudieron haber sido usadas.

Las zonas que habrían tenido las mayores pérdidas económicas directas después del sismo del 23/06/2001 serían El PP.JJ. San Francisco y El Cercado con S/.15,372,793.54 y S/.13,151,993.17 respectivamente. Para el caso de un sismo con 50 años de exposición las pérdidas estimadas serían de S/.26,964,969.67 y S/.23,705,690.81 en El PP.JJ. San Francisco y El Cercado respectivamente.

El estimado de las pérdidas económicas directas para la ciudad de Moquegua al 80% del total de las edificaciones ascienden a S/48'114,125.33, S/85'430,564.05 y S/92'947,571.70 para el sismo del 23/06/2001, el sismo con periodo de retorno de 450 años y el sismo de 950 años de periodo de retorno respectivamente.

Aunque no se pudo conseguir información de estimados de pérdidas después del sismo del 2001, algunos ingenieros de la estiman que este valor esté alrededor de los 70 millones de soles. Dicha estimación esta basada en los préstamos que está efectuando el estado a los propietarios afectados a través de entidades internacionales. De acuerdo a estas opiniones podríamos decir que el valor estimado es relativamente bajo. Sin embargo el tener el inventario de edificaciones al 80% del total, sumado a que el distrito de Samegua, que por cierto no está dentro del inventario de edificaciones elaborado en el presente estudio, también está participando del mencionado préstamo y el no saber con exactitud cual fue el valor real de las pérdidas económicas directas después del



sismo del 23/06/2001, hacen que sea difícil saber cuán alejado del valor real están los estimados de las pérdidas.

Los estimados de pérdidas económicas directas muestran que una zona de baja vulnerabilidad estructural, no conlleva a que las pérdidas económicas directas también sean bajas, a menos que dicha edificación este diseñada de modo que garantice también la baja vulnerabilidad no estructural y funcional (Tabiques, acabados y contenidos dentro de una vivienda). Tal es el caso de la Urb. López Albuja, sin embargo esta zona brinda mayor seguridad a las personas que las habitan.

El INDECI indica que el sismo del 23 de Junio ocasionó en el Departamento de Moquegua la muerte de 22 personas y 277 heridos. Estas cifras comparadas con las obtenidas, los cuales son 15 muertos y 277 heridos graves, reflejan una aproximación aceptable. Sin embargo es necesario completar el inventario de edificaciones, para poder hacer comparaciones reales.

## **5.2 Recomendaciones**

Algunos estudios de vulnerabilidad de la ciudad de Moquegua fueron elaborados antes del sismo del 23/06/2001, los cuales mostraban una vulnerabilidad alta para los principales centros poblados de la ciudad. Sin embargo esta información no fue tomada en cuenta, de manera que ni el gobierno local ni el estatal fueron capaces de elaborar planes de mitigación de desastres donde se incluyeran estas amenazas. Las consecuencias todos las conocemos, Por tanto se recomienda que en el futuro cualquier proyecto o estudio que involucre la planificación de la ciudad tenga en cuenta este trabajo y también el de Microzonificación Geotécnica (2002) de modo que se logre un desarrollo sostenible de esta Ciudad.

Es recomendable reducir el riesgo sísmico principalmente para un país como el nuestro, aunque la primera limitación que aparecería, casi como una constante, sería la disponibilidad de recursos, sin embargo, en promedio, en el tercer mundo el costo de un desastre (la suma de la ayuda directa, reconstrucción, producción perdida, etc.) puede llegar hasta un 5% del PBI (Franco, 2000), lo que se traduce en que los países y ciudades se retrasaran en su desarrollo años y décadas por no haber tomado, a tiempo, las medidas de prevención del desastre.

Se considera entonces que la mayor limitación es el desconocimiento de lo que hay que hacer y como hacerlo, a esto habría que sumarle la visión a corto plazo de muchos administradores y técnicos que ante los largos períodos de recurrencia de los sismos desean y ruegan que durante su gestión no se

presente ninguna catástrofe, olvidándose del compromiso no solo durante un corto lapso de tiempo, sino con la comunidad y las siguientes generaciones.

Este trabajo presenta un inventario de edificaciones al 80% de las edificaciones existentes, por lo que sería recomendable alcanzar el 100% de estas, de manera que se obtengan resultados más reales y constituyan una mejor herramienta para la toma de decisiones. Ese trabajo requeriría la colaboración de las entidades locales y regionales.

Esta información a nivel de resultados solo es útil para la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto por lo que sería recomendable que ellos la administren de manera que la actualicen cada cierto tiempo, podría ser cada año, y de esta forma se podría analizar mejor la dinámica de la Ciudad. Esto implica la implementación de un Sistema de Información Geográfica en alguna institución local, siendo la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto la que debería estar más interesada. La implementación de un SIG en la Municipalidad le permitiría además de gestionar el riesgo administrar todo lo referente al manejo de población y recursos.

### **5.3 Trabajos Futuros**

La metodología propuesta en el ATC-36 incluye la superposición del movimiento del terreno con sus correspondientes efectos colaterales (deslizamiento, licuación, falla local), efectos que no fueron analizados en este estudio. Sin embargo futuros trabajos deberían incluir estos efectos, principalmente en las partes altas de los PP.JJs El Siglo y San Francisco, donde existen posibilidades de deslizamientos.

Es necesario homogenizar criterios para la evaluación post-sísmica a través de fichas de evaluación técnica en donde figuren las causas más comunes que generen daño estructural de manera que pueda ser analizada y comparada con otros eventos. Proyectos con este enfoque han sido desarrollados en otros países, por ejemplo el ATC-21(California, 1987), los cuales deberían ser revisados para la elaboración de dicha ficha.

La mayoría de los países incluyendo los sudamericanos han elaborado sus propias matrices de daños y no solo a nivel de país sino a nivel de ciudades importantes. Por lo que se hace indispensable la elaboración una matriz de daños para el Perú y de ser posible para las principales ciudades, de modo que estas nos permitan estimar el riesgo con mayor aproximación.

También es indispensable mejorar las metodologías actuales referentes a determinar la vulnerabilidad de la edificaciones, clasificando a un mismo tipo de edificación(por ejemplo: mampostería confinada) de acuerdo no sólo a su

antigüedad de construcción si no a una serie de parámetros: geométricos, mecánicos, dinámicos de la estructura que son relevantes durante un evento sísmico. Este tipo de trabajos son llamados “Análisis de vulnerabilidad de segundo nivel de aproximación”, que actualmente están siendo desarrolladas en países como Colombia y Ecuador, el cual permite ajustar una matriz de daños.

Si el riesgo sísmico para edificaciones es un tema poco tratado en nuestro país, la investigación para determinar el riesgo sísmico de otro tipo de construcciones, tales como: puentes, carreteras, redes de agua y desagüe, son casi nulas. Además nuestro país es una región expuesta a diferentes amenazas (Sismos, Fenómeno del niño, otros) y consecuentemente nuestra infraestructura regional y nacional se ve afectada, por lo que se hace indispensable desarrollar metodologías que analicen el riesgo de estas construcciones.

El Riesgo es entendido como la convolución de la Vulnerabilidad y la Amenaza. Por lo tanto las Municipalidades deben realizar los estudios de microzonificación sísmica y los análisis de vulnerabilidad de sus edificaciones esenciales: Alcaldía, Consejo, Hospitales, Estaciones de Bomberos, Estaciones de Policía, Defensa Civil, Centrales Telefónicas, Subestaciones Eléctricas, Estaciones de Bombeo de los Sistemas de Acueducto, Instalaciones Petroleras, refinerías, entre otros.

El propósito del análisis del peligro y riesgo sísmico usando SIG presentado en este estudio es estimar el potencial de pérdidas y daños por terremotos en una determinada región. Aunque el enfoque de este estudio ha sido sobre sismos, la metodología basada en el SIG puede ser fácilmente aplicada a otros peligros naturales y provocados tal como inundaciones, tsunamis, incendios. Un análisis tal como este intenta ser útil para determinar áreas ó construcciones con un gran potencial de daños y pérdidas en futuros eventos, para planear la ubicación de futuras construcciones y para analizar y comparar los efectos regionales de varios escenarios. Los mapas de microzonificación son generalmente usados como un medio de transferir información desde la comunidad científica a la comunidad profesional involucrada en la mitigación del peligro y el riesgo.

Es necesario mejorar el análisis regional para hacer esto más beneficioso al usuario final. Particularmente en el área de administración y planeamiento de emergencias, la comunicación entre el usuario final y aquellos quienes desarrollan el análisis basado en SIG ayudará a definir: los tipos de resultados necesarios, cómo los resultados deberían ser visualizados, la velocidad en la cual ellos deberían estar disponibles, el nivel de detalle deseado y otras

especificaciones. La exactitud y la integridad de los resultados del análisis depende de la geología, suelos, geografía y la base de datos de las edificaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Rachel A. Davidson, **An Urban Earthquake Disaster Risk Index**, Stanford, California – 1997.
2. Stephanie A. King and Anne S. Kiremidjian, **Regional Seismic Hazard And Risk Analysis Through Geographic Information System**, Stanford, California – 1994.
3. Abel Ordóñez, **Tesis UNI “Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de Huaraz”**, Lima – 1984.
4. Luis Fernando Lazares La Rosa, **Tesis UNI “Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de las Edificaciones de los Departamentos de Moquegua y Tacna”**, Lima – 1994.
5. José F. Ríos, **Tesis UNI “Estudio de Vulnerabilidad y Medidas de Prevención Sísmica en el Centro de Lima”**, Lima – 1984.
6. Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres-Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID- UNI), **Memorias del Primer Simposium Nacional de Prevención y Mitigación de Desastres Naturales**, 01 de Junio al 03 de Junio de 1987.
7. Allan Lavel, **Viviendo en Riesgo**, Colombia – 1994.
8. Max Salas Ferro, **Tesis UNI “Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural del Hospital Guillermo Almenara Irigoyen”**, Lima – 1997.
9. Hugo Barron, **Tesis UNI “Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de Chimbote”**, Lima – 1984.
10. Instituto Metropolitano de Planificación, **Plan de Acondicionamiento Urbano del Callao 1993 – 2010**, Lima – 1993
11. Environmental Systems Research Institute, **Arc View GIS The Geographic Information System for Everyone**, USA – 1996.
12. Richard Forysth, **Sistemas Expertos**, Inglaterra – 1984.
13. Jhon Bisecas, **SQL El Lenguaje de las Bases de Datos Relacionales**, Madrid – 1990.
14. CONVENIO CISMID – CONCYTEC, **Zonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua**, Lima-2002.
15. Applied Technology Council, **Rapid Visual Screening of Seismically Hazardous Buildings (ATC-21)**, California-1987

16. Applied Technology Council, **Earthquake Damage Evaluation Data for California (ATC-13)**, California-1985
17. Applied Technology Council, **Earthquake Losses Evaluation Methodology and Databases for Utah (ATC-36)**, California-1994
18. CONVENIO UNSA – INDECI, **Evaluación de peligros de la Ciudad de Moquegua**, Arequipa – 2001.
19. Vizcarra M.A., **Tesis UNI “Microzonificación Sísmica de Moquegua Aplicada al Planeamiento Urbano Para La Mitigación de Desastres Naturales Empleando El Método Simplificado”**, Lima – 1986.
20. INGEOMINAS, **Microzonificación Sísmica de Bogota**, Bogota – 1997
21. ACI Capitulo Peruano, **Normas Peruanas de Estructuras**, Lima – 1998
22. Julio Kuroiwa, **Reducción de Desastres**, Lima – 2002
23. ININVI, **Quincha Prefabricada**, Lima – 1987
24. Julio Kuroiwa, **Curso de Capacitación Para Capacitadores**, Lima – 1996
25. ININVI, **Adobe Norma E-080**, Lima – 1987
26. Guillermo Saber M., **Investigación Tecnológica Del Adobe**, Cusco – 1989
27. CISMID – UNI, **Diseño Sísmico De Construcciones De Adobe**, Lima – 1993
28. R Saragoni, J. Crempien y R. Ayala, **“Características experimentales de los movimientos sísmicos sudamericanos”**, *Revista del IDIEM*, 21 (2), 67-86, México - 1982.
29. Omar D. Cardona, **Estimación Holística del Riesgo Sísmico Utilizando Sistemas Dinámicos Complejos**, Barcelona, España – 2001
30. Patricio Tapia, **Vulnerabilidad Sísmica de las Ciudades del Norte de Chile: Arica, Antofagasta y Copiapo**, Chile – 2002
31. CISMID – UNI , **El Sismo de Atico 23/06/2001**, Lima – 2001
32. Luis Zegarra, **Comportamiento Ante el Terremoto del 23/06/2001 de las Viviendas Reforzadas en Moquegua, Tacna y Arica**, Lima – 2002

33. C. Cuadra, M Karkee, J. Ogawa, **Preliminary Study on Seismic Hazard of a City Located in the Japan Sea Coast By Using Geographical Information System**, Japón – 2002
34. Javier Lermo, **Tesis UNAM “Observaciones de Microtremores en México y su Aplicación en la Ingeniería Sísmica”**, México – 1992
35. Javier Lermo, Fernando Lázares, **El Terremoto de Arequipa, Perú del 23/06/2001 (Mw=8.2), Efectos de Sitio en las Ciudades de Arequipa, Camaná, Moquegua, Ilo y Tacna y su Relación con los Daños en las Edificaciones**, Chile - 2002