

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**  
**SECCION DE POST-GRADO**



**“EVALUACION DEL RIESGO SISMICO EN LA CIUDAD DE  
AYACUCHO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON  
MENCION EN INGENIERIA ESTRUCTURAL**

*Presentado por:*

**ING. NORBERTT LUIS QUISPE AUCCAPUCLLA**

*LIMA – Perú*

*2004*

## RESUMEN

Las ciudades situadas en áreas de peligrosidad sísmica moderada o baja tienden a minusvalorar el peligro sísmico y a descuidar precauciones básicas de protección frente a los terremotos. Ello conlleva un aumento de su vulnerabilidad y, en consecuencia, suelen presentar un elevado riesgo sísmico que, a su vez, aumenta con el tiempo.

Este trabajo probablemente está entre los primeros que obtienen escenarios de daño sísmico de una ciudad en el Perú, mediante una aproximación que permite y efectúa un análisis edificio a edificio. Para ello se ha utilizado el sistema de información geográfica ARCVIEW que permite la incorporación y gestión de la información necesaria para la generación de escenarios de daño.

El sistema incorpora, entre otros, los mapas de peligrosidad sísmica básica, los mapas geológico y geotécnico, la zonificación de la ciudad y la altimetría. Toda esta información se usa posteriormente para individualizar la vulnerabilidad, daño y pérdidas económicas esperadas para una edificación bajo diferentes hipótesis de acción sísmica básica. Por otra parte, se ha recopilado, e incorporado a la herramienta, información individualizada de todas y cada una de los 1527 lotes que conforman la zona de estudio. Para cada una de ellas ha sido posible estimar su estado de edificación y, en su caso, las principales características estructurales y edad de los edificios.

En la presente tesis se realizaron trabajos de campo como estudios geofísicos y geotécnicos, así como el levantamiento estructural de cada lote a ser analizado; en donde el comportamiento dinámico del suelo se evaluó en base a mediciones de microtrepidaciones, refracción sísmica y a la caracterización geotécnica de la zona en estudio.

Todo este estudio ha ido orientado hacia la aplicación del método del índice de vulnerabilidad para estimar escenarios para la zona de estudio, con ciertas adaptaciones para nuestro medio, pero, la potencia de la herramienta creada trasciende los objetivos y aplicaciones del presente estudio permitiendo su ampliación o adaptación a otros problemas de análisis urbano; con esta metodología se pudo observar que gran parte de los edificios evaluados representan a una vulnerabilidad baja a media.

Para la obtención de las curvas de daño para las diferentes tipologías, se realizaron modelos y simulaciones de edificaciones de la zona, haciendo una adaptación de las curvas de daño construidas y calibradas por el Centro Peruano Japonés de Investigación Sísmica y Mitigación de Desastres (CISMID) a la metodología utilizada en este estudio; observándose efectivamente que los edificios mayoritariamente de mampostería presentan un daño alto para los tres niveles de aceleración esperados.

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; y para la presentación e interpretación de los escenarios se ha elegido una distribución a nivel de lotes y manzanas.

El sistema SIG creado ha demostrado también ser una excelente herramienta para la generación, gestión, representación y análisis de escenarios de daño bajo diferentes

hipótesis, siendo extremadamente útil y versátil, permitiendo de forma natural la incorporación de capas de información.

Los resultados de la tesis son de aplicación inmediata a la protección civil y a la planificación y gestión de planes de emergencia sísmica.

## SUMMARY

The cities located in low to moderate seismic hazard areas usually tend to ignore seismic hazards and neglect basic precautionary measures up against earthquakes. This fact increases its vulnerability and, therefore, usually elevates the seismic risk, which in turn, increase more and more with time.

This work probably is among the first to obtain seismic damage scenarios of a city in Peru, by using an approach that permits and carries out a building to building analysis. For the above, ARCVIEW geographical information systems have allowed the incorporation and management necessary for generating damage scenarios.

Among others, the system incorporates the basic seismic danger hazard maps, geologic and geotechnical maps, the zonification and altimeter of the city. All this information is used later on to individualize the vulnerability, damage and prospective economic losses for a construction under different hypothesis of basic seismic action. On the other hand, individualized information of all and each one of the 1527 lots that form the study area have been gathered and incorporated to the tool. It has been possible to estimate, for each one of them, its state of construction and, regarding its case, the age and main structural characteristic of the buildings.

In the present thesis, field works were carried out, such as geotechnical and geophysical studies, as well as the structural rising of each lot to be analyzed; where the dynamic soil behavior was evaluated based on microtrepidation measurements, seismic refraction and on geotechnical characterization of the area to be studied.

This whole entire study has been geared toward the application of the vulnerability index method to calculate scenarios for the study area, with certain adaptations for our means, but, the power of the created tool transcends the objectives and applications of the present study allowing its amplification or adaptation to other urban analysis problems; with this methodology one could observe that the majority of evaluated buildings have a low to medium vulnerability.

Models and simulations of buildings in the zone were carried out to obtain damage curves for the different typologies, the Peruvian Japanese Center of Seismic and Mitigation Investigation of Disasters (CISMID) made an adaptation of the built and calibrated damage curves using the methodology used in this study; effectively observing, for the most part, that masonry buildings present a high damage for the three prospective levels of acceleration.

Once a superficial seismic threat for the three earthquakes scenarios was determined, the damages and losses are calculated superimposing the threat maps with the construction inventory; and a lot and block distribution has been chosen for the presentation and interpretation of the scenarios.

The created SIG system also proved to be an excellent tool for generating, managing, representing and analyzing damage scenarios under different hypothesis, being extremely useful and versatile, allowing the natural incorporation of information layers.



The results of the thesis are immediately applied to protect civilians and to plan and manage seismic emergency plans.

## INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS .....	xi
INDICE DE TABLAS .....	xv
<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 Generalidades .....	2
1.2 Objetivo generales .....	5
1.3 Objetivos específicos .....	5
1.4 Motivación de la investigación .....	5
1.5 Contenido del estudio .....	6
<b>CAPÍTULO II</b> .....	9
2 ASPECTOS GENERALES DEL RIESGO SISMICO .....	10
2.1 Introducción .....	10
2.2 Peligrosidad sísmica .....	11
2.2.1 Sismicidad .....	12
2.2.2 Sismicidad global .....	14
2.2.3 Sismicidad en el Perú .....	16
2.3 Evaluación de la sismicidad .....	22
2.3.1 Intensidad .....	23
2.3.2 Magnitud .....	24
2.3.3 Momento sísmico .....	25
2.3.4 Mecanismo de los terremotos .....	26
2.4 Vulnerabilidad sísmica .....	27
2.5 Daño en las edificaciones .....	30
2.6 Riesgo sísmico .....	31
2.7 Estudios sobre riesgo sísmico .....	33
2.8 Mitigación del riesgo sísmico .....	35
2.9 Resumen .....	39
<b>CAPÍTULO III</b> .....	41
3 VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES .....	42
3.1 Introducción .....	42
3.2 Aspectos que afectan la vulnerabilidad sísmica .....	43
3.3 Funciones de vulnerabilidad .....	43
3.4 Problemas asociados con los métodos expuestos .....	45
3.4.1 Problemas asociados con los métodos analíticos .....	45
3.4.2 Problemas asociados con los métodos cualitativos .....	46
3.5 Ventajas y limitaciones de las metodologías analizadas .....	47
3.5.1 Método del ATC – 14 .....	47

3.5.2	Método NAVFAC .....	48
3.5.3	Métodos JAPONES .....	48
3.5.4	Método VENEZOLANO .....	49
3.5.5	Método FEMA-178 = FEMA-310 .....	49
3.5.6	Método del I.S.T.C. ....	50
3.5.7	Metodología propuesta por Hurtado y Cardona .....	50
3.5.8	Método de la AIS .....	51
3.5.9	Método del Índice de vulnerabilidad. ....	51
3.6	Metodología escogida para el trabajo .....	52
3.6.1	Facilidad para ser aplicada .....	52
3.6.2	Credibilidad de la metodología .....	52
3.7	Método del índice de Vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1982) .....	53
3.7.1	Índice de vulnerabilidad para estructuras de mampostería.....	53
3.7.2	Funciones de vulnerabilidad observada y simulada para edificios de mampostería .....	55
3.7.3	Funciones de vulnerabilidad simulada para edificios de hormigón armado ....	58
3.8	Adaptación del método del índice de vulnerabilidad .....	61
3.8.1	Parámetros planteados para utilizar el método .....	61
3.8.2	Asignación de clases A, B, C, D para cada parámetro .....	62
3.9	Resumen .....	82
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>83</b>
4	<b>SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA .....</b>	<b>84</b>
4.1	Introducción.....	84
4.2	Definición de los sistemas de información Geográfica (SIG) .....	85
4.3	Componentes de SIG .....	86
4.4	Datos geográficos .....	88
4.4.1	Atributos .....	89
4.4.2	Elementos geométricos .....	91
4.4.2.1	Coberturas .....	93
4.4.2.2	Elementos avanzados .....	94
4.5	Áreas de aplicación de los SIG .....	98
4.6	Resumen .....	100
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>103</b>
5	<b>ESTUDIOS Y BASE DE DATOS UTILIZADOS EN LA EVALUACION DEL RIESGO SISMICO .....</b>	<b>104</b>
5.1	Introducción .....	104
5.2	Evaluación del peligro sísmico en la ciudad de Ayacucho .....	105
5.2.1	Introducción .....	105
5.2.2	Sismicidad en Ayacucho .....	106
5.2.3	Metodología empleada .....	108
5.2.4	Sismicidad y vulcanismo .....	108

5.2.5	Determinación de las fuentes sismogénicas y los parámetros de recurrencia para la evaluación del peligro sísmico .....	112
5.2.6	Determinación de los parámetros sismológicos .....	115
5.2.7	Evaluación de peligro sísmico .....	118
5.2.8	Aceleraciones máximas esperadas .....	120
5.3	Condiciones geológicas y geomorfológicas .....	120
5.3.1	Ubicación del área de estudio .....	122
5.3.2	Topografía .....	124
5.3.3	Geomorfología local .....	124
5.3.4	Geología del área de estudio .....	126
5.3.4.1	Geología regional .....	126
5.3.4.2	Geología local .....	128
5.4	Características geotécnicas de la ciudad de Ayacucho .....	131
5.4.1	Exploración y muestreo de suelos y rocas .....	131
5.4.2	Clasificación de suelos y rocas .....	132
5.4.3	Capacidad portante de los suelos .....	133
5.4.4	Zonificación geotécnica .....	135
5.5	Evaluación de las características dinámicas de los suelos .....	137
5.5.1	Introducción .....	137
5.5.2	Medición de microtrepidaciones en la ciudad de Ayacucho .....	138
5.5.2.1	Descripción del equipo .....	139
5.5.2.2	Procedimiento del ensayo .....	140
5.5.2.3	Evaluación e interpretación de las mediciones .....	140
5.5.2.4	Zonificación de períodos según las microtrepidaciones .....	141
5.5.3	Ensayos de refracción sísmica .....	143
5.5.3.1	Descripción del equipo .....	145
5.5.3.2	Procedimiento de los trabajos de campo .....	146
5.5.3.3	Evaluación e interpretación de los trabajos .....	147
5.5.4	Aplicación de la teoría de amplificación dinámica .....	147
5.5.4.1	Métodos de la evaluación .....	148
5.5.4.2	Descripción de programa SHAKE .....	150
5.5.4.3	Modelaje de perfiles representativos del suelo .....	151
5.5.4.4	Zonificación por amplificación sísmica del área de estudio .....	154
5.6	Zonificación geotécnica sísmica del área de estudio .....	156
5.6.1	Integración de los fenómenos geodinámicos dentro del entorno SIG .....	157
5.7	Inventario de edificaciones .....	159
5.7.1	Selección del área urbana para la evaluación de riesgo sísmico .....	159
5.7.2	Información necesaria vs. disponible .....	159
5.7.3	Inventario de edificaciones .....	163
5.8	Resumen.....	173
<b>CAPÍTULO VI .....</b>		<b>175</b>
6	<b>EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE DAÑO .....</b>	<b>176</b>
6.1	Introducción .....	176

6.2	Cálculo de Índice de vulnerabilidad .....	177
6.3	Cálculo de Índice de daño .....	202
6.4	Análisis de pérdidas económicas .....	208
6.5	Resumen.....	211
<b>CAPÍTULO VII .....</b>		<b>213</b>
8	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION .....	214
8.1	Conclusiones .....	214
8.2	Recomendaciones y futuras líneas de investigación .....	218
REFERENCIAS .....		223
ANEXO A.	Escalas de intensidades .....	229
ANEXO B.	Geotecnia .....	237
ANEXO C.	Mediciones de microtrepidaciones .....	247
ANEXO D.	Estudios de refracción sísmica .....	255
ANEXO E.	Diagrama de flujo de los 11 parámetros de vulnerabilidad .....	283
ANEXO F.	Resultados del estudio de riesgo sísmico .....	291
ANEXO G.	Estado de daño .....	307
ANEXO H.	Simulación de lotes y obtención de curvas de daño .....	315
ANEXO I.	Tablas emitidas por la CONATA .....	393
PLANOS		

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Modelo simplificado de peligro sísmico .....	12
Figura 2.2	La transmisión de un sismo .....	13
Figura 2.3	Origen de un terremoto, con su proyección en la superficie terrestre .....	13
Figura 2.4	Tipos principales de falla, provocados por un terremoto .....	14
Figura 2.5	Mapa de sismicidad global. En esta figura se muestra los terremotos ocurridos a partir de 1966, con magnitud superior a 6, en la escala Richter.....	15
Figura 2.6	Ubicación y movimiento relativo de las placas en la actualidad .....	15
Figura 2.7	Mapa de peligrosidad sísmica global .....	16
Figura 2.8	Unidades estructurales de Perú según Audebaud et al, (1973) y Dalmayrac et al.(1987).....	17
Figura 2.9	Distribución de los terremotos ocurridos en Perú entre 1513 y 1959, $I_0 \geq VIII$ MM. (Silgado, 1978) .....	19
Figura 2.10	Mapa de isoaceleraciones para 50 años de vida útil.....	21
Figura 2.11	Mapa de peligrosidad sísmica del Perú acuerdo a la Norma de Construcciones Sismorresistente del Perú de 2003 (NTE-030) .....	22
Figura 2.12	Comparación gráfica de las diferentes escalas de intensidad utilizadas en el mundo ...	24
Figura 2.13	Tipo de falla de presión y mecanismo focal correspondiente .....	26
Figura 2.14	Tipo de falla normal y mecanismo focal correspondiente.....	27
Figura 2.15	Metodología utilizada para la evaluación del riesgo sísmico específico a nivel urbano .....	32
Figura 2.16	Proceso de decisión del manejo sísmico (CSSC, 1999).....	38
Figura 2.17	Programa de mitigación del riesgo sísmico (CSSC, 1999). .....	39
Figura 3.1	Función de vulnerabilidad teórica. ....	45
Figura 3.2	Funciones de índice de vulnerabilidad propuesta por Angeletti et al, 1988.....	55
Figura 3.3	Función de vulnerabilidad observada para edificios de mampostería no reforzada en España para un nivel de intensidad de VII en la escala MSK (Yépez, 1994). Las funciones propuestas por Angeletti et al, 1988 se representan por líneas discontinuas .....	56
Figura 3.4	Función de vulnerabilidad simulada para intensidad VII MSK (curva gruesa) y función de vulnerabilidad observada (curva delgada). Cada punto corresponde a por lo menos un edificio generado.....	57
Figura 3.5	Función de vulnerabilidad para los edificios de mampostería no reforzada para diferentes niveles de intensidad en la escala MSK (Yépez, 1996). Las líneas discontinuas delgadas representan las funciones italianas propuestas por Angeletti et al. (1988) .....	58
Figura 3.6	Función de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado con pórticos sismorresistentes para las intensidades VII, VIII y IX en la escala MSK.....	59
Figura 3.7	Función de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado de losas reticulares para las intensidades VI, VII y VIII en la escala MSK (Yépez, 1996) .....	60
Figura 3.8 A	Área de muros de mampostería de ladrillo de arcilla, concreto y otros con un espesor promedio de 0.15 metros, en función de la dimensión en planta del edificio para el eje X .....	65
Figura 3.8 B	Área de muros de mampostería de ladrillo de arcilla, concreto y otros con un promedio de 0.15 metros, en función de la dimensión en planta del edificio para el eje Y.....	65



Figura 3.9 A	Área de muros de mampostería de adobe y piedra con un espesor promedio de 0.8 mt. espesor en función de la dimensión en planta del edificio para el eje X. ....	66
Figura 3.9 B	Área de muros de mampostería de adobe y piedra con un espesor promedio de 0.8 mt. en función de la dimensión en planta del edificio para el eje Y .....	66
Figura 3.10	Mapa topográfico del área de estudio para la vulnerabilidad sísmica. ....	72
Figura 3.11	Formas originales en planta consideradas en el índice de vulnerabilidad.....	74
Figura 3.12	Forma general de un planta considerada para el cálculo del parámetro 6 (configuración en planta del edificio) .....	74
Figura 3.13	La ampliación de las zonas próximas al centroide permiten observar los valores considerados para el cálculo del parámetro. Las elipses indican la zona ampliada .....	75
Figura 3.14	Formas originales consideradas para la evaluación del parámetro 7. ....	77
Figura 3.15 A	Relación del área total construida con el espaciamiento máximo de muros en los edificios de mampostería de ladrillo , concreto y otros. ....	78
Figura 3.15 B	Relación del área total construida con el espaciamiento máximo de muros en los edificios de mampostería de adobe, piedra y otros.....	79
Figura 4.1	Ejemplo de representación de información correspondiente a un área geográfica con temas y capas (Mena et al, 2001).....	86
Figura 4.2	Principales componentes de un sistema de información geográfica.....	87
Figura 4.3	Componentes básicos de los datos geográficos (ESRI, 1995).....	88
Figura 4.4	Estructural del análisis georreferencial.....	89
Figura 4.5	Tablas de atributos básicos y de relación.....	90
Figura 4.6	Estructura normal de un proyecto de SIG.....	90
Figura 4.7	Elementos geográficos básicos para la modelación del mundo real..	91
Figura 4.8	Proceso topológico ARCO-NODO o conectividad.....	92
Figura 4.9	Proceso topológico, POLÍGONO – ARCO o definición de áreas.....	93
Figura 4.10	Proceso topológico IZQUIERDA – DERECHA o contigüedad.....	93
Figura 4.11	Generación de un modelo TIN a partir de una cobertura de puntos.....	96
Figura 4.12	Sombreado analítico de una superficie a partir de un modelo TIN.....	96
Figura 4.13	Diagrama que muestra la etapa en donde se aplican los sistema de información indicadas, geográfica dentro de los estudios de riesgo sísmico.....	99
Figura 5.1	Sismos presentados en el departamento de Ayacucho según las coordenadas los cuales se registraron para análisis del riesgo sísmico.....	107
Figura 5.2	Metodología para calcular el peligro sísmico.....	108
Figura 5.3	Fuentes sísmogénicas superficiales. ....	113
Figura 5.4	Fuentes sísmogénicas intermedias y profundas.....	114
Figura 5.5	Departamento de Ayacucho.....	123
Figura 5.6	Computadora portátil.....	139
Figura 5.7	Sensores triaxiales.....	139
Figura 5.8	Fuentes originarias de las ondas de microtrepidaciones.....	140
Figura 5.9	Onda Longitudinal o P.....	143
Figura 5.10	Angulo crítico de refracción.....	144
Figura 5.11	Perfil de velocidades.....	144
Figura 5.12	Plato metálico y comba.....	145
Figura 5.13	Geófonos.....	145
Figura 5.14	Computadora portátil, PC Toshiba SS-3480 PA.....	146
Figura 5.15 A	Relación H/V para el punto M1.....	149
Figura 5.15 B	Esquema del proceso para evaluar los efectos locales del suelo.....	150



Figura 5.16	Tiempo historia de aceleración corregida, registrado el 17/10/1966.....	151
Figura 5.17	Tiempo Historia de aceleración corregida, registrado el 31/05/1970.....	152
Figura 5.18	Tiempo Historia de aceleración corregida, registrado el 03/10/1974.....	152
Figura 5.19	Curvas de variación cortante con respecto a la deformación.....	153
Figura 5.20	Curvas de variación de amortiguamiento con respecto a la deformación.....	153
Figura 5.21	Integración de los fenómenos geodinámicos en el entorno SIG.....	158
Figura 5.22	Distribución del número de edificaciones de acuerdo a las zonas de estudio.....	165
Figura 5.23	Distribución según áreas construidas.....	166
Figura 5.24	Distribuciones según tipo de edificación.....	168
Figura 5.26	Distribución de lotes de acuerdo al año de construcción y por zonas de estudio.....	169
Figura 5.27	Distribución de lotes de acuerdo al número de pisos.....	170
Figura 5.28	Distribución de lotes de acuerdo a la irregularidad en planta.....	170
Figura 5.29	Distribución de lotes de acuerdo a la irregularidad en elevación. ....	171
Figura 5.30	Distribución de lotes de acuerdo a la asistencia técnica recibida.....	172
Figura 5.31	Distribución de lotes de acuerdo al uso de la edificación.....	173
Figura 6.1	Albañilería sin ningún arriostamiento ni confinamiento de muros.....	178
Figura 6.2	Albañilería con columnas pero sin vigas de confinamiento.....	178
Figura 6.3	Albañilería bien confinada.....	179
Figura 6.4	Mampostería de adobe sin arriostamiento horizontal y vertical.....	179
Figura 6.5	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 1.....	180
Figura 6.6	Mortero de mala calidad, con juntas irregulares.....	181
Figura 6.7	Mampostería de adobe y piedra no homogénea.....	181
Figura 6.8	Mampostería con una buena calidad de su sistema resistente.....	182
Figura 6.9	Mampostería de piedra.....	182
Figura 6.10	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 2. ....	183
Figura 6.11	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 3.....	184
Figura 6.12	Vivienda emplazada sobre grandes pendientes.....	185
Figura 6.13	Viviendas emplazada sobre grandes pendientes.....	185
Figura 6.14	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 4. ....	186
Figura 6.15	Vivienda de dos pisos sin diafragma rígido visible.....	187
Figura 6.16	Vivienda con diafragma rígido visible.....	187
Figura 6.17	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 5. ....	188
Figura 6.18	Planos digitalizados y vistas aerofotográficas, usados para el parámetro 6.....	189
Figura 6.19	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 6.....	190
Figura 6.20	Discontinuidad de masas en los entrepisos.....	191
Figura 6.21	Piso blando en el primer nivel.....	191
Figura 6.22	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 7.....	192
Figura 6.23	Distancia entre muros.....	193
Figura 6.24	Separación máxima entre muros.....	193
Figura 6.25	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 8.....	194
Figura 6.26	Cubierta de teja para una construcción de albañilería.....	195
Figura 6.27	Cubierta de calamina para una construcción de adobe.....	195
Figura 6.28	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 9.....	196
Figura 6.29	Carteles publicitarios en uno de los lotes.....	197
Figura 6.30	Antena parabólica sobre una edificación.....	197
Figura 6.31	Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 10 .....	198
Figura 6.32	Construcción de adobe en mal estado de conservación.....	199

Figura 6.33 Construcción de albañilería en buenas condiciones..... 199

Figura 6.34 Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 11 ..... 200

Figura 6.35 A Funciones de vulnerabilidad-daño-aceleración para estructuras de mampostería sin refuerzo, adobe y tapial. .... 203

Figura 6.35 B Funciones de vulnerabilidad-daño-aceleración para construcciones de albañilería ..... 203

Figura 6.35 C Funciones de vulnerabilidad-daño-aceleración para estructuras de mampostería reforzada o confinada. .... 204

Figura 6.36 Porcentaje de edificios clasificados por grado de daño, dependiendo del terremoto de estudio considerado..... 206

Figura 6.37 Vista tridimensional del mapa de vulnerabilidad sísmica..... 207

Figura 6.38 Vista tridimensional del mapa de escenarios de daño para una aceleración de 0.1g en el basamento rocoso..... 208

Figura 6.39 Pérdidas estimadas para las tres aceleraciones de estudio..... 210

Figura 6.40 Porcentaje de pérdidas económicas del costo total de las edificaciones ..... 210

Figura 6.41 Porcentajes de pérdidas en función de los períodos de retorno de los sismos escenarios ..... 211

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Frecuencia de terremotos basados en observaciones desde 1900 (USGS).....	3
Tabla 3.1	Escala numérica del índice de vulnerabilidad Iv de los edificios de mampostería (Benedetti and Petrini, 1984).....	54
Tabla 3.2	Valores de los coeficientes de las funciones de vulnerabilidad para los edificios de mampostería, obtenidos en el cálculo de las regresión polinómicas. ....	58
Tabla 3.3	Escala numérica del índice de vulnerabilidad Iv para las estructuras de hormigón armado (Benedetti y Petrini 1984).....	59
Tabla 3.4	Valores de los coeficientes de las funciones de vulnerabilidad para los edificios de hormigón armado aporricados con vigas y columnas, obtenidos en el cálculo de las regresión polinómicas.....	60
Tabla 3.5	Valores de los coeficientes de las funciones de vulnerabilidad para los edificios de hormigón armado aporricados con losas reticulares, obtenidos en el cálculo de las regresión polinómicas. ....	60
Tabla 3.6	Comparación entre el Reglamento Nacional de Construcciones y los parámetros propuestos por el método de índice de vulnerabilidad. ....	62
Tabla 3.7	Parámetros utilizados en este estudio para el método del índice de vulnerabilidad.....	62
Tabla 3.8	Valores recomendados de esfuerzo cortante máximo para mampostería de edificios históricos. ....	67
Tabla 3.9	Valores recomendados de esfuerzo cortante máximo para paneles de mampostería (Yépez, 1996).....	67
Tabla 3.10	diafragmas tipo utilizado para el cálculo de coeficiente.....	69
Tabla 4.1	Tablas de atributos y extensiones comunes utilizadas para los elementos.....	90
Tabla 4.2	Resumen de los elementos utilizados en un cobertura.....	94
Tabla 4.3	Formas de SIG que sirven para modelar los elementos del mundo real.....	98
Tabla 5.1	Parámetro sismológico de las fuentes sismogénicas.....	116
Tabla 5.2	Coordenadas geográficas de las fuentes sismogénicas de subducción y continentales.....	117
Tabla 5.3	Valores representativos de criterios empleados en la selección de movimientos sísmicos de diseño.....	119
Tabla 5.4	Períodos naturales para diferentes tipos de estructuras (períodos cortos e intermedios) calculados de acuerdo a la norma sismorresistente E-030.....	155
Tabla 5.5	Valores de $\sigma$ y $\gamma$ como relación entre intensidad y aceleración.....	159
Tabla 6.1	Distribución de resultados del parámetro 1.....	178
Tabla 6.2	Distribución de resultados del parámetro 2.....	181
Tabla 6.3	Distribución de resultados del parámetro 3.....	184
Tabla 6.4	Distribución de resultados del parámetro 4.....	186
Tabla 6.5	Distribución de resultados del parámetro 5.....	188
Tabla 6.6	Distribución de resultados del parámetro 6.....	189
Tabla 6.7	Distribución de resultados del parámetro 7.....	192
Tabla 6.8	Distribución de resultados del parámetro 8.....	194
Tabla 6.9	Distribución de resultados del parámetro 9.....	196
Tabla 6.10	Distribución de resultados del parámetro 10.....	198
Tabla 6.11	Distribución de resultados del parámetro 11.....	200
Tabla 6.12	Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios.....	202
Tabla 6.13	Escala de daño considerada en este trabajo para la construcción de los mapas	

	de escenario de daño propuesta en este trabajo.....	205
Tabla 6.14	Ecuaciones del índice de daño.....	205
Tabla 6.15	Resultados del índice de daños obtenidos, considerando tres terremotos de estudio.....	206
Tabla 6.16	Porcentajes de daño promedio para cada aceleración dentro de la zona de estudio.....	208
Tabla 6.17	Tabla de pérdidas estimadas.....	210

# **CAPITULO I**

## **Introducción**

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1 Generalidades**

Algunas preguntas que se formulan después de oír y ver los cuantiosos daños provocados por un movimiento sísmico son: ¿Se ha incrementado la magnitud de los terremotos? o ¿Se han incrementado el número de ellos?, y la única respuesta es que no ha habido incremento en ninguno de los casos. Lo que ha sucedido es que las ciudades que se encuentran localizadas en zonas altamente sísmicas han crecido de una forma incontrolada, aumentando con esto el riesgo de sufrir grandes pérdidas de vidas humanas y materiales como consecuencia de un terremoto. Por otra parte el avance en las telecomunicaciones, la mejora de los equipos de detección y la reducción de su costo ha permitido detectar sismos que antes no eran posibles, ya sea por su lejanía o por su baja magnitud, así como hacer que la información llegue en tiempo real a cualquier parte del mundo (Person, 1999: Nyffenegger,1997). De acuerdo a estos investigadores, el número promedio anual de terremotos con magnitud (en escala Richter) entre 7 – 7.9, es aproximadamente 18 y terremotos con magnitud mayor a 8 es de 1, (tabla 1.1). El número de terremotos fuertes (7 – 7.9) ocurridos en el año de 1999, estuvo dentro de la media anual, sin que ninguno superara la magnitud de 8, sin embargo, estas estadísticas no se reflejan en el número de muertes causadas por los terremotos, ya que duplicaron el promedio anual al llegar a la cifra de 22,000. La causa de este gran incremento fueron las 17,000 muertes causadas sólo por el terremoto de Turquía el 17 de agosto, cuya magnitud fue de 7.4.

Otros terremotos con grandes pérdidas en vidas humanas fueron los de Colombia el día 25 de enero con una magnitud de 5.8, en el que murieron más de 1,180 personas; el de Grecia ocurrido el 7 de septiembre, con una magnitud de 5.8, provocando 144 muertos; el de Taiwán el 20 de septiembre con una magnitud de 7.6 en el que murieron más de 2400 personas o el de Turquía el 12 de noviembre con magnitud de 7.1, en el que murieron más de 830 personas. En el año 2000, se registraron 15 terremotos cuya magnitud fue superior a 7, de los cuales tres alcanzaron la magnitud de 8 entre ellos el de Sumatra al sudeste de Indonesia ocurrido el 4 de junio con magnitud de 8.00, el de la Región de Nueva Irlanda ocurrido el 16 de noviembre con magnitud de 8.1 y el de la región de Nueva Bretaña el 17 de noviembre

con magnitud de 8. Sin embargo, a pesar del tamaño de estos terremotos sólo se reportaron 213 víctimas, la mayor parte como consecuencia del terremoto de Indonesia. El año 2001, cumplió las estadísticas de la tabla 1.1, aunque desgraciadamente duplicó el número de víctimas a causa del terremoto ocurrido el 26 de enero en la India cuya magnitud de 7.7, ocasionó 20,000 muertes, o el de El Salvador el 13 de enero con magnitud de 7.7, ocasionando 852. Uno de los terremotos más fuertes de estos últimos años se registro cerca de las costas de Perú, con una magnitud de 8.4, ocasionando 139 víctimas.

Desafortunadamente, todos los terremotos, además de las víctimas mortales que provocan, causan cuantiosos daños materiales y dejan miles de personas damnificadas. Ejemplo de ellos es el terremoto de Taiwán cuyos daños estimados se acercan a los 14,000 millones de dólares, dejando 50,000 damnificados y 53,000 edificios dañados; el de Turquía, provocó daños entre 3,000 y 6,500 millones de dólares con cerca de 600,000 damnificados y 82,000 viviendas dañadas o el de la India que además de las víctimas mortales provocó 166,836 heridos, destruyó cerca de 339,000 viviendas y dañó otras 783,000 en el área cercana al epicentro (USGS).

DESCRIPCION	MAGNITUD	PROMEDIO ANUAL
Destructivo	>8	1
Grande	7 - 7.9	18
Fuerte	6 - 6.9	120
Moderado	5 - 5.9	800
Ligero	4 - 4.9	6,200 (estimado)
Menor	3 - 3.9	49,000 (estimado)
Muy pequeño	<3.0	magnitud 2 - 3: cerca 1,000 por día magnitud 1 - 2: cerca 8,000 por día

**Tabla 1.1** Frecuencia de terremotos basados en observaciones desde 1900 (USGS)

Estos desastres dejan en evidencia que los programas de evaluación de Riesgo Sísmico no se han aplicado en estas zonas para poder evitar o en el mejor de los casos, mitigar estas pérdidas, a pesar del gran avance que se tiene de ellos. Esta situación se presenta en la mayoría de los países en vías de desarrollo (cuya peligrosidad sísmica en muchos casos es además alta), debido a la falta de recursos económicos en la mayoría de los casos y a una mala gestión del gobierno, lo que impide la realización de estos estudios.

El Riesgo sísmico involucra dos conceptos fundamentales: la Peligrosidad sísmica y el comportamiento dinámico de las estructuras al estar sometidas a acciones externas accidentales. Desgraciadamente, el conocimiento actual de estos dos conceptos aun es limitado debido a la gran incertidumbre existente en la información y en los métodos para estudiarlos, principalmente cuando se pretenda realizarlos a nivel urbano. Por ejemplo, para la peligrosidad sísmica, se tiene incertidumbre en la predicción, ubicación y cuantificación de la fuerza de un sismo, mientras que para el comportamiento dinámico de las estructuras la incertidumbre puede estar en el comportamiento mismo de la estructura, la calidad de los materiales de construcción, los procesos constructivos, la mano de obra, etc. Los trabajos recientes sobre riesgo sísmico se han enfocado al estudio del comportamiento dinámico de estructuras gracias a que se han alcanzado un importante avance en el desarrollo de métodos de



análisis y diseño. Sin embargo, estos métodos sólo se pueden aplicar a estructuras nuevas que se van a construir o construcciones cuyo uso obliga a mantener su funcionamiento después de una crisis sísmica, siendo costoso o poco viable aplicarlos al resto de las construcciones. Por lo tanto quedan excluidas las construcciones existentes, que en su mayoría fueron diseñadas sin considerar normativa sísmica alguna y en el mejor de los casos, sólo se les aplicó algún método estático para determinar las fuerzas horizontales equivalentes, pero no se utilizó un diseño sísmico apropiado.

Actualmente existen métodos sofisticados para los estudios del comportamiento sísmico de las estructuras mediante análisis complejos como son los análisis no lineales utilizando registros reales o simulados (Wilson, 1992; Mena, 1993), análisis por elementos finitos tridimensionales (Wilson and Habibullah, 1992), análisis dinámicos considerando propiedades inciertas (Katafygiotis and Papadimitriou, 1996), análisis tomando en cuenta efectos de segundo orden (MacRae, 1996), en los que se involucran una cantidad de operaciones matemáticas importantes. Sin embargo, el propósito de la evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas, es determinar posibles escenarios de daño para los cuales utilizar tales métodos implicaría costos muy elevados y un esfuerzo computacional muy grande, por lo tanto se recurre a métodos simplificados, que además de reducir costos permite obtener resultados adecuados. Esta búsqueda debe estar además apoyada por estudios socioeconómicos, ya que la experiencia en algunos países que cuentan con medidas de mitigación de riesgo, ha demostrado que aplicar una metodología muy refinada en zonas de baja peligrosidad, sólo lleva a la pérdida de dinero y tiempo, y en algunos casos inclusive es poco probable que se pueda implementar, por lo que una estimación de escenarios de daño sísmico rápido puede ser suficiente para identificar los principales factores que contribuyen al riesgo sísmico (Villacis et al, 2000).

Los métodos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios son probablemente los más adecuados para poder implementarlos en zonas urbanas como lo han demostrado algunos trabajos existentes (OEA, 1993; Cella, 1994; Barbat, 1996; Yépez et al, 1995; Yépez, 1996; Mena, 1997a; Mena, 1997a; Mena et al, 1997b; HMC, 1997; CSSC, 1999).

De cualquier forma el grado de simplificación de cada método dependerá de los objetivos planteados en cada estudio, el cual puede ser tan grande, como la determinación del índice de vulnerabilidad basándose en la información geométrica e histórica de cada edificio o tan pequeña como calcular la vulnerabilidad elemento por elemento.

Una herramienta relativamente reciente en este tipo de estudios son los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estos sistemas han venido a facilitar la implementación de las metodologías, el manejo de la información y, sobretodo, la visualización de los resultados, gracias a su capacidad georreferencial, lo que permite modelar los elementos de la zona de estudio de una forma más real. Además la poderosa estructura en la que están contruidos el SIG facilita el manejo de la gran cantidad de datos, de una forma sencilla y rápida. El uso del SIG se han incrementado de manera sustancial en esta última década como lo demuestran los estudios realizados por King et al, 1994; Blais et al, 1996; Xie et al, 1996; Mena, 1997a; Mena et al, 1997b; SERGISAI, 1998.

## 1.2 Objetivo generales

En los últimos diez años se ha alcanzado un avance importante en el estudio del Riesgo Sísmico en muchas ciudades; esto ha permitido mejorar la metodología propuesta para la evaluación de la calidad estructural de los edificios y evaluar los posibles escenarios de daño como consecuencia de un terremoto. Sin embargo, la falta de un sistema integrador entre la metodología planteada y la aplicación a la ciudad, unido a la falta de información de los elementos en riesgo ha limitado los estudios. Por esta razón se han planteado los siguientes objetivos:

Elaborar un mapa de riesgo sísmico tomando como base el sistema de información geográfica (GIS), siguiendo la metodología propuesta por Stephanie A. King y Anne S. Kiremidjian, que resulta de gran utilidad para la planificación de comunidades grandes.

Establecer niveles de vulnerabilidad sísmica, estimar los posibles daños en las edificaciones y calcular las posibles pérdidas materiales debido a los movimientos sísmicos esperados del terreno para la ciudad de Ayacucho alcanzando resultados concluyentes en forma general.

## 1.3 Objetivos específicos

Dentro de los objetivos específicos tendremos los siguientes:

Realizar mapas de la ciudad de Ayacucho donde indiquen los estudios de suelos, geológicos, nivel freático, microzonificaciones, etc.

Realizar un mapa de zonificación geotécnica sísmica de la ciudad de Ayacucho, en función a los períodos fundamentales del suelo, amplificaciones sísmicas, etc.

Verificar el posible provecho que se le podría obtener a la información que maneja la oficina de Catastro Municipal en las fichas prediales de la ciudad de Ayacucho.

Ubicar en un mapa de la zona de estudio las posibles zonas más vulnerables ante movimientos sísmicos esperados.

Calcular las pérdidas económicas directas de la zona de estudio para los diferentes eventos sísmicos propuestos.

Elaborar un mapa de riesgo sísmico.

## 1.4 Motivación de la investigación

El Perú está localizado dentro de una de las zonas sísmicas más activas del planeta correspondiendo a los bordes del Océano Pacífico. El emplazamiento tectónico del Perú es complejo pues en su territorio converge la placa de Nazca y La placa Sudamericana. Debido a ello, el Perú ha sido sometido a una serie de movimientos sísmicos que ha dado como resultado víctimas humanas y cuantiosos daños en edificaciones.

En los eventos sísmicos las víctimas humanas que se presentan durante los sismos en su gran mayoría están asociadas con problemas en las construcciones, por avalanchas disparadas por el evento sísmico, o bien por la ola marina producida por un sismo que ocurre costa afuera, lo que se denomina tsunami.

En la ciudad de Ayacucho, un gran porcentaje de construcciones existentes son autoconstruidas, los cuales no siguieron código alguno de construcción. Además, si se agrega que la mayoría de viviendas en Ayacucho corresponden a casas de 1, 2 y 3 pisos y que precisamente este tipo de edificaciones son las que más sufrieron en los sismos producidos en el Perú; se observa que estas estructuras merecen tener mayor importancia de la que comúnmente se les ha dado en la ciudad.

Todo sismo perjudicial reafirma la importancia del estudio de riesgo sísmico para estimar las consecuencias de un terremoto. Aunque algún proceso en el área de predicción sísmica ha sido hecho, los terremotos no pueden predecirse exactamente en el tiempo, magnitud y localización. Aun cuando una correcta predicción fuera posible, el consecuente potencial de daño no puede ser previsto.

El riesgo sísmico no puede ser eliminado pero puede ser analizado efectivamente y mitigar sus efectos por combinación de la información geológica y geográfica regional disponible, haciendo uso de tecnologías recientemente desarrollada.

Como bien lo justifican muchos ingenieros la estimación del riesgo sísmico para la ciudad de Ayacucho, y en general para cualquier ciudad del país, contribuye con información para la elaboración de políticas de desarrollo urbano, tales como:

- 1) Modificación del grado de vulnerabilidad de elementos que no pueden ser relocalizados.
- 2) Disminución de la densidad de zonas con elementos de alta vulnerabilidad.
- 3) Relocalización de elementos de vital importancia.
- 4) Definición estratégica de áreas de emergencia, y otros.

Calcular posibles escenarios de pérdidas para Ayacucho permite al Municipio plantear medidas pre y post-sismo, como la preparación de médicos, grupos de emergencia, centros médicos, etc. Así como determinar anticipadamente las necesidades de la población después del evento.

En general, se debe ante todo cuantificar el problema de riesgo sísmico para luego gestionar políticas de inversión, rehabilitación y reforzamiento que minimicen las pérdidas humanas, sociales y económicas de la ciudad. Está estimado que por cada dólar que se invierte en la mitigación del riesgo sísmico, un promedio de diez dólares es ahorrado en costo de recuperación después del sismo.

## **1.5 Contenido del estudio**

El presente trabajo está dividido en 7 capítulos, en los cuales se describe de manera clara la problemática planteada para la realización de este estudio, los trabajos de campo, laboratorios y de gabinete realizados, la metodología seleccionada para la evaluación del problema, la herramienta informática que sirve para la implementación

de la metodología, la construcción de una base de datos de los elementos de estudio y el cálculo de los escenarios de daño. De esta forma, los capítulos de este trabajo tratan los siguientes aspectos:

El capítulo II hace una revisión de los aspectos generales del estudio de riesgo sísmico, es decir, la peligrosidad sísmica, vulnerabilidad sísmica y la mitigación de las estructuras. Se hace una revisión del estado del arte de estos conceptos, para conocer la actualidad en cuanto a los estudios de vulnerabilidad sísmica, técnicas de evaluación y formas de aplicación a casos reales.

El capítulo III explica la metodología adoptada para este trabajo, haciendo una comparación con algunas metodologías existentes que sirven como recomendaciones por organismos internacionales.

El capítulo IV presenta una revisión del sistema de información geográfica, mostrando las herramientas que servirán para implementar la metodología para la realización del estudio de Riesgo Sísmico.

El capítulo V muestra los procedimientos seguidos para la construcción de la base de datos, describiendo los estudios realizados tales como: Estudio de peligro sísmico, estudios de refracción sísmica y de microtrepidaciones con los cuales se analizarán los fenómenos geodinámicos de la ciudad de Ayacucho, así también se recopiló información acerca de trabajos anteriores de geotécnica para poder así zonificar nuestra área de estudio; también se podrá encontrar la base de datos de las edificaciones evaluadas para poder así realizar los estudios de vulnerabilidad.

El capítulo VI muestra el cálculo de los parámetros del índice de vulnerabilidad para las edificaciones evaluadas, así como el cálculo de los escenarios de daño y pérdidas económicas, para los cuales se tuvieron que generar funciones de daño para las distintas tipologías existentes en la zona de estudio, realizando modelos por computadoras de edificaciones existentes.

Y por último, en el capítulo VII se hace un análisis de los resultados obtenidos, las conclusiones generales de los resultados y finalmente las recomendaciones pertinentes para la utilización de los resultados, así como las futuras líneas de investigación.



**CAPITULO II**  
**Aspectos generales**  
**del riesgo sísmico**

## 2. ASPECTOS GENERALES DEL RIESGO SISMICO

### 2.1 Introducción

De acuerdo a la Real Academia Española la palabra **Riesgo** significa “Contingencia o proximidad de algún daño”, mientras que en términos técnicos significa “la posibilidad de pérdida o daño o exposición al cambio de daño o pérdida” (Souter, 1996; Dowrick, 1997).

La palabra **peligrosidad**, la Real Academia Española la define como “calidad de peligro”, mientras que en términos técnicos se expresa como “amenaza impuesta por ciertos fenómenos naturales, como son los huracanes, erupciones, terremotos, etc., que puedan causar consecuencias adversas a la actividad humana, impacto social negativo y pérdidas humanas y económicas severas” (Souter, 1996; CSSC, 1999). Finalmente, la **vulnerabilidad** la Real Academia la define como “algo que puede ser herido o recibir lesión, física o moralmente” y técnicamente “se utiliza como una escala para expresar las diferentes formas de responder los edificios al ser sometidos a un terremoto” (Grunthal, 1998). Es evidente que las tres palabras tienen una relación directa entre ellas, por lo que antes de utilizarlas se debe encontrar una definición estándar que permita distinguirlas para su correcto uso. De esta manera algunos comités y trabajos científicos se han encargado de establecer una nomenclatura adecuada dentro del área de la sismología e ingeniería sísmica, que permita aclarar las diferencias existentes. En base a esto, el Riesgo, la Peligrosidad y la Vulnerabilidad Sísmica se puede definir de la siguiente manera:

- **Riesgo Sísmico.-** Son las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado de la falla de estructuras cuya capacidad resistente fue excedida por un terremoto.
- **Peligrosidad Sísmica.-** Es la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un terremoto, provocando efectos adversos a la actividad humana. Estos fenómenos además del movimiento de terreno pueden ser, la falla del terreno, la deformación tectónica, la licuefacción, inundaciones, tsunamis, etc.



- **Vulnerabilidad.-** Es un valor único que permite clasificar a las estructuras de acuerdo a la calidad estructural intrínseca de las mismas, dentro de un rango nada vulnerable a muy vulnerable ante la acción de un terremoto.

Por lo tanto, se puede observar que el Riesgo Sísmico depende directamente de la Peligrosidad y de la Vulnerabilidad, es decir, los elementos de una zona con cierta peligrosidad sísmica pueden verse afectados en menor o mayor medida dependiendo del grado de vulnerabilidad sísmica que tengan, ocasionando un cierto nivel de Riesgo Sísmico del Lugar.

Para entender mejor estas definiciones se necesita hacer una descripción más detallada de cada una de ellas, por lo tanto a continuación se muestran los conceptos generales de la Peligrosidad Sísmica, la Vulnerabilidad Sísmica y de qué forma se relacionan para obtener el Riesgo Sísmico. Es importante hacer mención del concepto de Mitigación Sísmica, que servirá como vínculo entre los resultados obtenidos en el estudio de Riesgo y las acciones o medidas que debe de tomar las autoridades correspondientes para reducirlo, mediante planes de emergencia.

## 2.2 Peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica es la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un terremoto, como puede ser el movimiento mismo del terreno, así como la licuefacción, los deslizamientos de tierra, inundaciones, rupturas de fallas, etc. A los que llamaremos efectos colaterales de un terremoto. El tamaño y localización de estos efectos colaterales dependen de diversos factores, principalmente de las características geológicas y geotécnicas del lugar, pero indudablemente de las características del terreno (hipocentro, mecanismo, magnitud, duración, contenido frecuencial, etc.).

Por tal motivo, el primer paso en la evaluación de la peligrosidad sísmica es caracterizar las zonas sismo-tectónicas, para posteriormente entender mejor las características de los terremotos. Generalmente, en su evaluación se utilizan métodos o modelos probabilísticos simplificados de cálculos basados en el establecimiento de leyes estadísticas para definir el comportamiento sísmico de una zona, las fuentes sísmicas y la atenuación del movimiento del suelo, expresando los resultados en forma de probabilidad de ocurrencia de los distintos tamaños de los terremotos, la probabilidad de excedencia de distintos niveles de intensidad del movimiento o a los valores máximos de aceleración esperados en un lugar y en un intervalo de tiempo determinado. Sin embargo, estos modelos involucran una gran cantidad de incertidumbres lo que lleva inevitablemente a ser calculados a partir de la extrapolación de datos, a la adaptación de estudios de otras regiones para que estos modelos sean completamente funcionales y en muchos casos a la simplificación de los mismos.( Somerville, 2000).

Desafortunadamente, esta incertidumbre es más grande en áreas con una actividad sísmica esporádica, en donde los catálogos sísmicos y las bases de datos de movimientos fuertes son escasas. En algunos casos, las teorías geofísicas pueden sustituir los datos faltantes, pero las predicciones de la recurrencia de sismos y de la propagación de las ondas sísmicas no son lo suficientemente avanzadas para simulaciones teóricas que sean aceptadas como una norma para la observación de sismos locales, por lo que en muchos casos es necesario considerar el juicio de los

expertos en el ajuste de los modelos para evaluar la peligrosidad sísmica, esto hace que el juicio de los expertos se considere una parte integral de la evaluación (Woo, 1992).

En esta situación, una posible estimación de la peligrosidad sísmica se puede obtener a partir del análisis de la historia sísmica del sitio, utilizando los datos macrosísmicos históricos de los que se disponga, particularmente en regiones caracterizadas por largos períodos de retorno. No obstante, esta información puede dar lugar a problemas de interpretación debido a que los datos históricos son cualitativos y fueron obtenidos en épocas completamente diferentes, sin utilizar una escala macrosísmica común. Debido a estos problemas, las características de cada nivel de intensidad en un sitio tienen que ser calculado en términos probabilísticos, expresando el nivel de probabilidad asociado a cada grado de intensidad (Mucciarelli y Magri, 1992).



2.1 Modelo simplificado de peligro sísmico.

### 2.2.1 Sismicidad

Las descripciones de la ocurrencia y los parámetros esenciales de los sismos son presentadas por Key (1988) y Bolt (1978); la figura 2.2, tomada de la misma referencia, muestra los principales elementos en la transmisión de un sismo.

Luego de un gran período de acumulación de esfuerzos de confinamiento en el plano de falla, el sismo es ocasionado por un deslizamiento súbito que causa una liberación masiva de energía dentro de la corteza terrestre. Esta energía es irradiada desde la fuente en forma de onda compresión (P) y ondas de corte (S). En la superficie se generen ondas secundarias del tipo Love y Rayleigh. Cada onda viaja a su propia velocidad, y las ondas P y S son refractadas y reflejadas en las discontinuidades y se manifiestan en la superficie. En cualquier punto de ésta, una combinación compleja de las formas de las ondas ocurre en un período que se extiende de 5 segundos a 1 minuto mientras que para un sismo más severo, la duración será mayor.

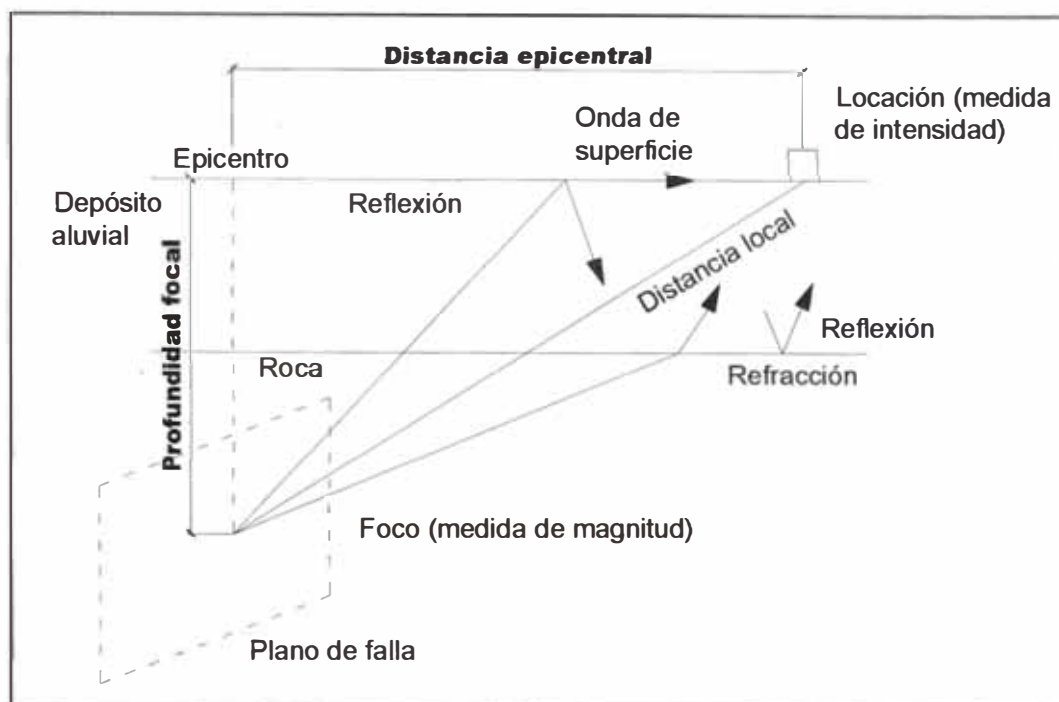


Figura 2.2 La transmisión de un sismo. Fuente Key (1988)

Un terremoto empieza en un punto llamado foco o hipocentro situado en la superficie de ruptura de la falla que se localiza por una latitud, longitud y profundidad (figura 2.3), y una proyección en la superficie de la tierra, llamada epicentro con coordenadas de latitud y longitud únicamente. La ruptura progresa desde el hipocentro a lo largo de la superficie de ruptura a una velocidad finita, hasta que se detiene. El esfuerzo acumulado se libera completamente al alcanzar una sección más fuerte que la falla o porque se ha llegado al final de la misma. El tiempo total del movimiento causado por un terremoto está relacionado con la longitud del tiempo necesario para que la ruptura progresa a lo largo de la superficie de ruptura completa (Nyffenegger, 1997).

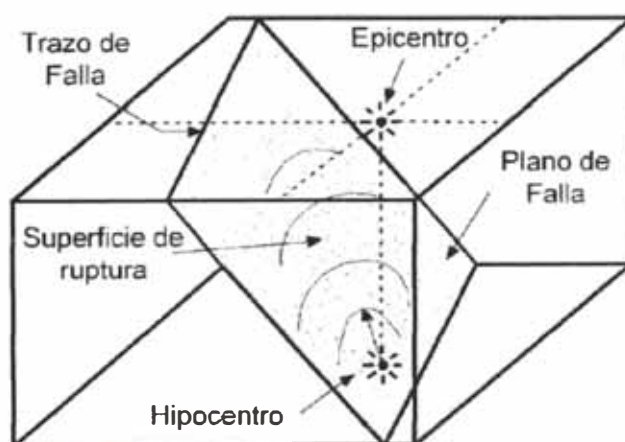


Figura 2.3. Origen de un terremoto, con su proyección en la superficie terrestre. (Nyffenegger, 1997).

Existen tres tipos de fallas que pueden ocurrir ya sea en la superficie de la Tierra o dentro de los Océanos (Figura 2.4), esta puede ser: falla por deslizamiento, que corresponde a un desplazamiento horizontal relativo por los dos lados de la falla que

normalmente suele tener un plano de falla vertical; una falla reversible o por compresión, en la cual las fuerzas por compresión causan una falla por cortante forzando que la parte superior continúe elevándose y la falla normal o por extensión, esta falla es la inversa de la anterior, las deformaciones por extensión jalan los bloques superiores hacia abajo del plano de falla inclinando (Dowrick, 1997; Nyffenegger, 1997).

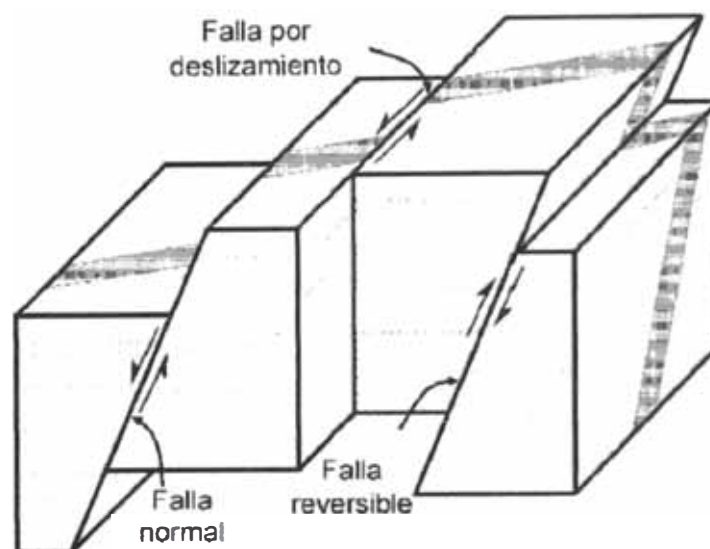


Figura2.4. Tipos principales de falla, provocados por un terremoto (Bolt, 1999)

### 2.2.2 Sismicidad global

La localización del origen de un terremoto se puede calcular por medio de las ondas sísmicas leídas en los diferentes observatorios sismológicos del mundo. Basándose en esta información se ha elaborado mapas con la distribución uniforme de los terremotos alrededor de la Tierra, como muestran las figuras 2.5, 2.6 Y 2.7, en donde se puede observar claramente un cinturón de actividad sísmica separando grandes regiones oceánicas y continentales, con interesantes excepciones en regiones donde los terremotos son nulos (Bolt, 1999).

Como se puede observar en la Figura 2.5, la distribución geográfica de los terremotos en el planeta muestran zonas en la Tierra con una mayor actividad sísmica, siendo la primera el denominado cinturón Circum – Pacífico, que comprende toda la parte oeste del continente americano, desde Alaska hasta el sur de Chile y desde la parte norte de las islas Aleutianas, siguiendo por todas las islas del Japón hasta Indonesia y Nueva Zelanda. La segunda zona denominada Mediterráneo – Himalaya se extiende desde las islas Azores al sudoeste de la Península Ibérica, pasando por Italia, Grecia, Turquía, Persia llegando hasta el Himalaya y norte de la India y de la China. Finalmente, la tercera zona está formada por Cordilleras submarinas que dividen el Atlántico en dos partes, la del índico y la del Pacífico frente a las costas occidentales de América del Sur. Los estudios de sismicidad de estas regiones han servido para confirmar la teoría de la tectónica de placas y la formación de los continentes.



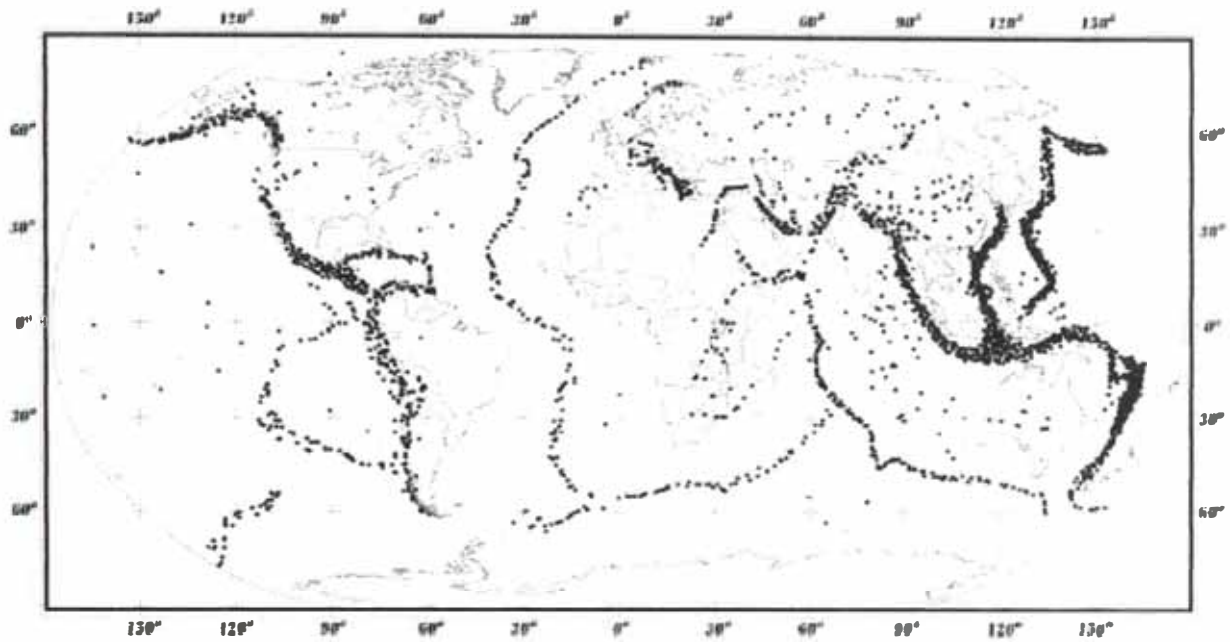


Figura 2.5 Mapa de Sismicidad global. En esta figura se muestra los terremotos ocurridos a partir de 1966, con magnitud superior a 6, en la escala Richter. (Bolt, 1999)

Uno de los trabajos más recientes sobre mapas de peligrosidad sísmica, fue el proyecto piloto desarrollado por el programa de Evaluación de Peligrosidad Sísmica Global (GSHAP, 1999) en la Década Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, declarada por la ONU. Este trabajo se desarrolló uniendo mapas parciales elaborados por las diferentes regiones y áreas de prueba (Figura 2.7). El mapa describe la aceleración máxima del terreno (en unidades PGA, por sus siglas en inglés) con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años, correspondiente a un período de retorno de 475 años. La clasificación del suelo en general se consideró roca a excepción de Canadá y EE.UU., donde se supone que las condiciones del suelo correspondían a un suelo rocoso-firme. El mapa dibuja los niveles probables del movimiento del terreno en una escala de colores de menor probabilidad (blanco) a mayor probabilidad (oscuro).

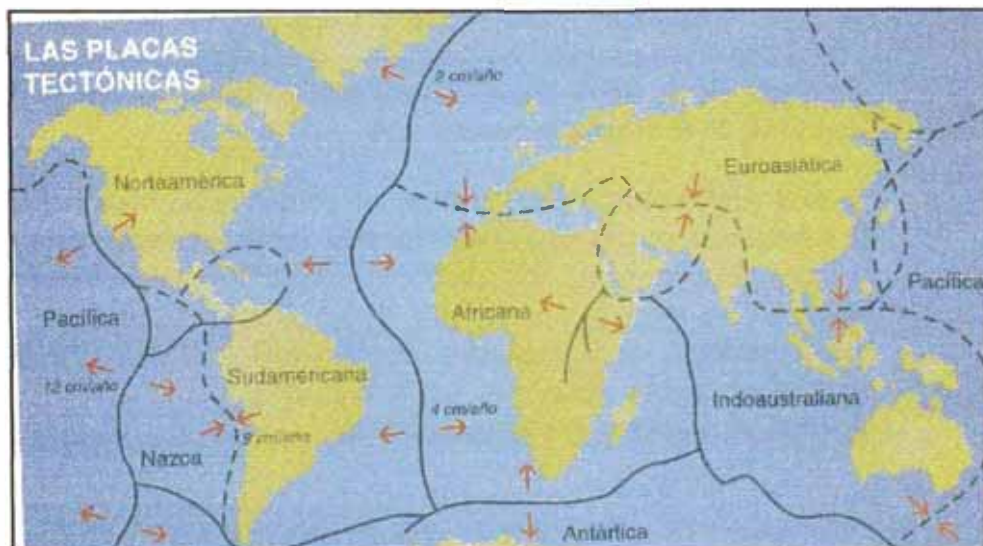


Figura 2.6 Ubicación y movimiento relativo de las placas en la actualidad.

Los colores del mapa se eligieron para delinear aproximadamente la peligrosidad correspondiente al nivel actual de la misma. El color más claro representa una peligrosidad baja, mientras que el más intenso, representa una alta peligrosidad. Especialmente, el blanco y verde corresponde a valores entre 0 – 8% g ( en donde, g es la aceleración de la gravedad); el amarillo y el naranja corresponden a una peligrosidad moderada entre 8 y 24 % g; el color rosa y rojo corresponde a una peligrosidad alta entre 24 y 40% g y el rojo oscuro y café corresponden a una peligrosidad muy alta, con valores superiores al 40% de g. En general, los sitios con peligrosidad alta ocurren en áreas delimitadas por las diferentes placas (Figura 2.6).

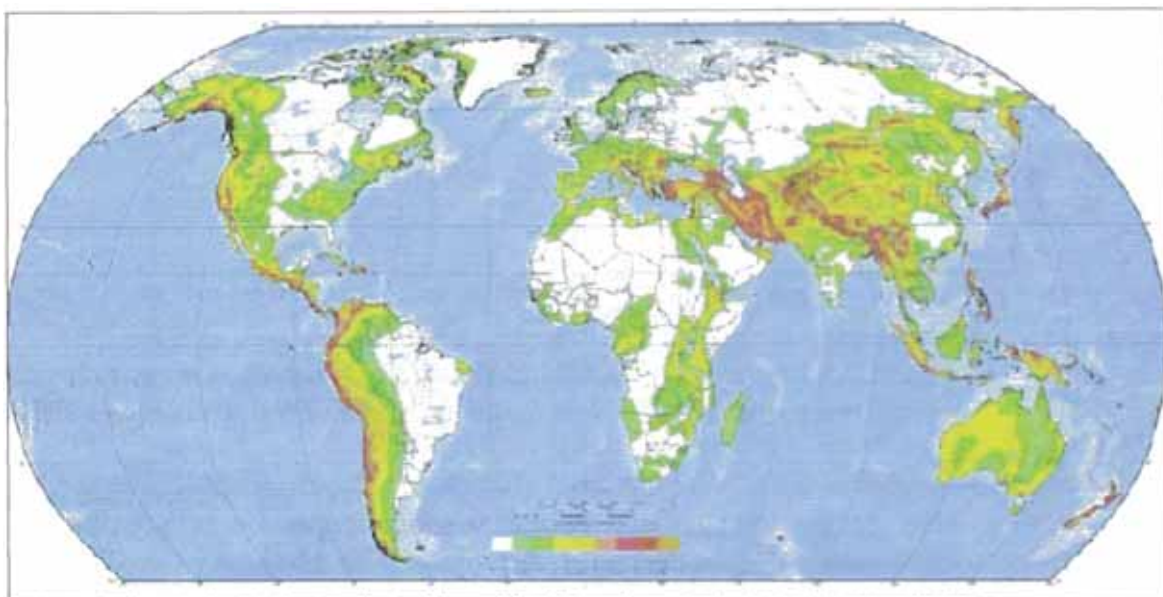


Figura 2.7. Mapa de Peligrosidad Sísmica global (GSHAP, 1999)

### 2.2.3 Sismicidad en el Perú

El borde occidental de América del Sur se caracteriza por ser una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo. El Perú forma parte de esta región y su actividad sísmica más importante está asociada al proceso de subducción de la placa oceánica bajo la placa continental, generando terremotos de magnitud elevada con relativa frecuencia. Un segundo tipo de actividad sísmica está producido por las deformaciones corticales presentes a lo largo de la Cordillera Andina, con terremotos menores en magnitud y frecuencia. La distribución de la sismicidad en Perú, ha sido tema de diversos estudios utilizando datos telesísmicos y regionales a fin de estudiar la geometría de la subducción o bien para delinear las zonas de mayor deformación superficial en el interior del continente.

Los Andes son un claro ejemplo de cordillera formada como resultado del proceso de subducción de una placa oceánica bajo una continental. Esta cordillera se extiende a lo largo del continente Sudamericano, desde Venezuela hasta el Sur de Chile. En la figura 2.8 se muestra un esquema de las principales unidades estructurales formadas como resultado de la evolución de esta cordillera. En esta figura y de izquierda a derecha se puede identificar La franja costera, Cordillera Occidental, la cordillera Oriental, el Altiplano y la zona subandina.

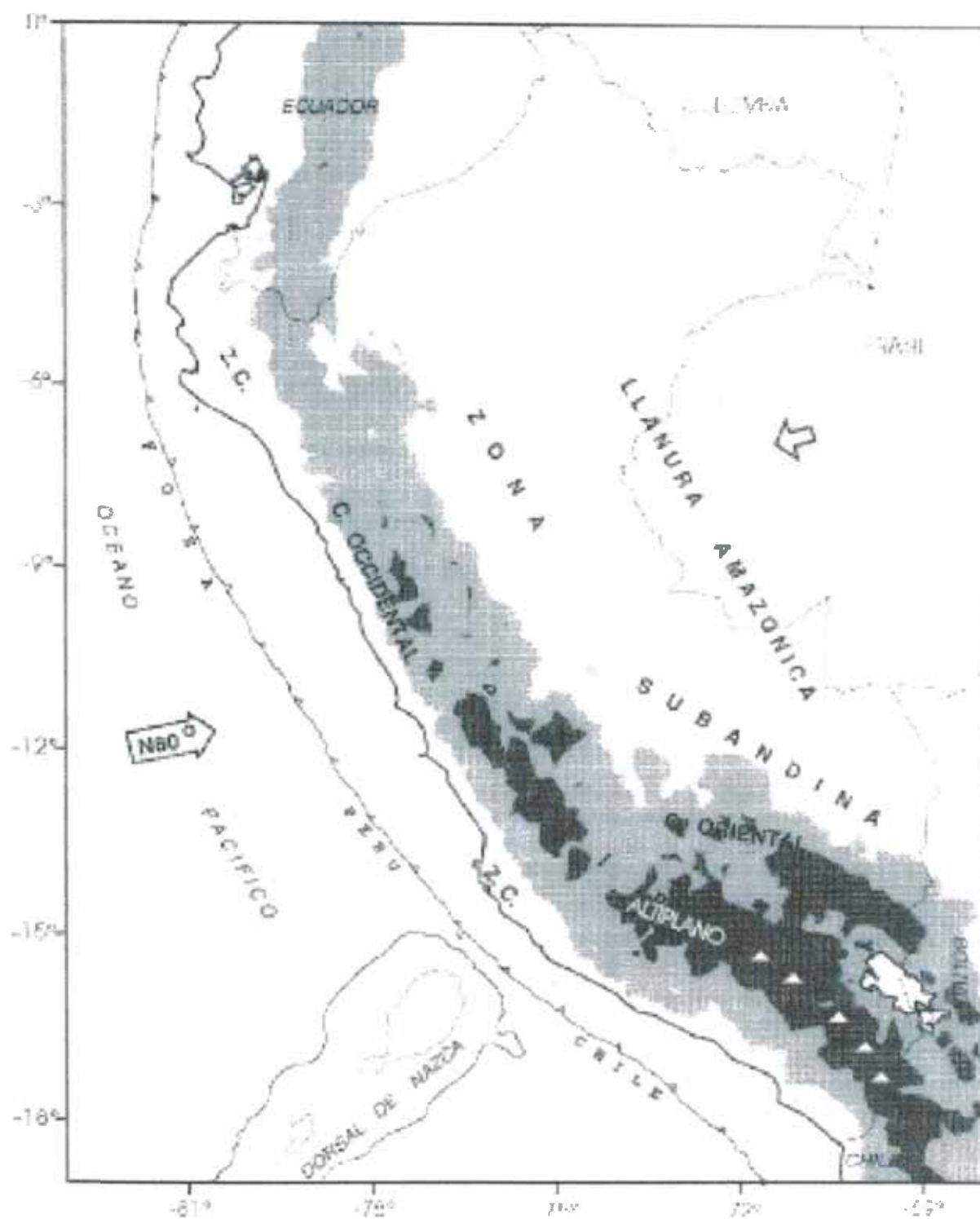


Figura 2.8 Unidades estructurales de Perú según Audebaud et al, (1973) y Dalmayrac et al. (1987). La flecha indica la dirección de convergencia de las placas según Minster y Jordan (1978). La topografía viene indicada por el color de fondo: Blanco menos de 1500 m, gris claro entre 1500-4000 m y gris oscuro mayor a 4000m.



### Que es el cinturón de fuego?

América del Sur y por ende el Perú, es parte de la región conocida como cinturón de Fuego del Pacífico y en donde la Tierra libera más de 85% del total de su energía en forma de terremotos y erupciones volcánicas. Este alto índice de sismicidad se debe a que en el borde Oeste de América del Sur se produce la colisión entre las placas de Nazca y Sudamérica, la primera más débil se introduce por debajo de la segunda originando el proceso conocido como subducción, el mismo que se constituye en la principal fuente generadora de terremotos en el Perú. Los terremotos que han producido muerte y destrucción en cualquier ciudad de la costa deben su origen a este proceso (ejemplo; terremotos de 1940, 1966, 1970, 1974 que afectaron a la ciudad de Lima). Así mismos, como consecuencia de la colisión de placas en el interior del país, se han formado diversos tipos de fallas geológicas que produjeron grandes terremotos, los que también causaron muerte y destrucción en las ciudades o localidades aledañas a las fallas. Son conocidos los terremotos producidos por las fallas de la Cordillera Blanca en Ancash (1947), Huaytapallana en Huancayo(1969), Tambomachay en Cusco (1986), Moyobamba en San Martín (1990 y 1991) y Ayacucho (1981 y 1999).

### El Silencio Sísmico

Debe entenderse que si en una determinada área ha ocurrido grandes terremotos en el pasado, estos volverán a ocurrir en el futuro; por lo tanto, todas las ciudades o localidades que están ubicadas a lo largo de nuestra costa y próximas a las fallas, siempre estarán propensas a soportar este tipo de Peligro.

El análisis espacio-tiempo de los sismos dentro de un marco estadístico, permite estimar la periodicidad de los sismos de mayor magnitud, la misma que expresada en términos probabilísticos, permiten conocer el peligro sísmico al que están expuestas las ciudades (vivienda, edificaciones, etc.). En términos generales, el peligro de sismos en el Perú ha sido totalmente identificado, pero como afecta éste a las ciudades y a sus habitantes...?. La respuesta nos conduce a evaluar la vulnerabilidad de los mismos. La vulnerabilidad de una ciudad o localidad se define como el nivel de respuesta que esta tiene ( vivienda, edificios, etc.) ante un determinado peligro previamente identificado y que en nuestro caso son los sismos. Actualmente, son muy pocos los estudios en conjunto que permitan conocer la vulnerabilidad de las ciudades del Perú.

**Sismicidad histórica;** La información sobre la sismicidad histórica de Perú se remonta a los años 1513-1532. La calidad de estos datos depende fundamentalmente de la distribución y densidad de la población en las regiones afectadas por los terremotos. La recopilación más completa sobre esta sismicidad ha sido realizada por Silgado (1968, 1978, 1985).

En la figura 2.9 se muestra los terremotos con  $I_0 \geq VIII$  MM para el período 1513-1959. En esta figura se observa que los terremotos se distribuyen principalmente a lo largo de la línea de Costa centro y sur, debido probablemente a que estas regiones eran las más pobladas y donde se construyeron las ciudades más importantes después del siglo XVI. En el interior del país tan solo se localizan tres terremotos ocurridos en 1650 (Cuzco,  $I_0 = X$  MM), 1946 (Huaraz,  $I_0 = IX$  MM) y 1947 (Satipo,  $I_0 = VIII$  MM ). Según Silgado (1978) y Dorbath et al. (1990) en la costa central de Perú, los terremotos mayores son los de 1586 (primer gran terremoto del que se tiene documentación histórica), 1687 y el de 1746 que destruyó completamente la ciudad de

Lima y genero un maremoto con olas de 15-20 m de altitud. Durante el periodo 1513-1959, Lima fue destruida sucesivamente por un total de 15 terremotos. En la región Sur, los terremotos más importantes son los de 1604, 1784 y 1868; este último es el mejor documentado y descrito en detalle por Montessus de Ballore (1911) y Vargas (1922). Estos terremotos destruyeron las principales ciudades del Sur de Perú (Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno) y norte de Chile (Arica, Iquique). El terremoto de 1868 ( $I = X$  MM) fue sentido desde Guayaquil (Ecuador) hasta Concepción (Chile) generando un importante maremoto con olas de 14m de altitud (Silgado, 19778; Dorbath et al., 1990). En la región Andina, el único terremoto histórico documentado es el ocurrido en 1650, que destruyó la ciudad de Cuzco y fue sentido en Lima, Arequipa y La Paz. En la zona central, el terremoto ocurrido en 1947 afectó un área máxima de 4,000 Km<sup>2</sup> y fue sentido en casi todo el Perú. Para este periodo (1513-1920), no existe información sobre terremotos ocurridos en la zona Andina y subandina de Norte y Centro del Perú, pero en la actualidad se ha comprobado que estas regiones son sísmicamente muy activas.

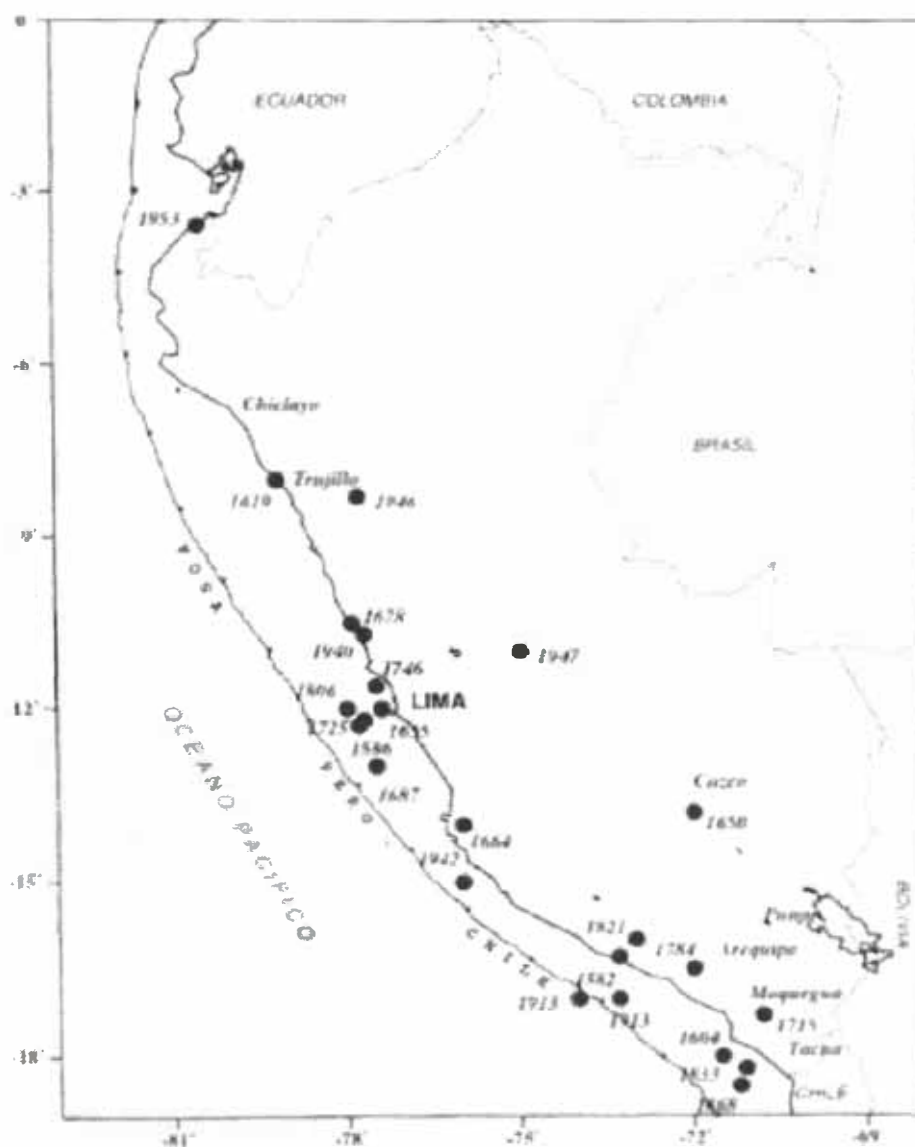


Figura 2.9 Distribución de los terremotos ocurridos en Perú entre 1513 y 1959,  $I_0 \geq VIII$  MM. (Silgado, 1978)

**Sismicidad Instrumental;** La información sismológica instrumental del Perú se encuentra recopilada en el Catálogo Sísmico del Proyecto SISRA (Sismicidad de la Región Andina, 1985), que tiene eventos desde el año de 1990. Este catálogo fue actualizado hasta 1990-I con los datos verificados por el ISC (International Seismological Centre). Para la elaboración de este catálogo se consideraron los registros cuya magnitud  $m_b$  es mayor o igual a 4.0, ya que a partir de este valor los sismos adquieren importancia ingenieril. Actualmente se cuenta con una información sismológica hasta el 2002 y ha sido recopilada del INEIC (National Earthquake Information Centre) y del IGP (Instituto Geofísico del Perú). Atendiendo a la profundidad de los focos, los terremotos pueden clasificarse en tres tipos: terremotos con foco a profundidad superficial ( $h \leq 60$  km), a profundidad intermedia ( $60 < h \leq 350$  km) y foco profundo ( $h > 350$  km). La sismicidad con foco a profundidad superficial se localiza en la zona oceánica en dirección paralela a la línea de costa produciendo terremotos de magnitud elevada con relativa frecuencia. El terremoto de 1970 localizado en esta zona, es considerado uno de los más catastróficos en el mundo por haber producido la muerte de 67,000 personas, 250,000 desaparecidos y 180,000 heridos. Otro grupo importante de terremotos son los producidos por la subsidencia del escudo brasileño bajo la Cordillera Andina, estando la mayor parte de estos sismos localizados en la zona de transición entre la Cordillera Oriental y el margen occidental de la zona Subandina. En la zona del Altiplano también existen sismos superficiales pero son menos numerosos y más dispersos. En general, los terremotos que ocurren en esta zona presentan magnitudes moderadas. Asimismo, se observa la existencia de zonas de bajo índice de sismicidad entre la línea de costa y la Cordillera Occidental ( $4^\circ\text{S}$ - $13^\circ\text{S}$ ) y en la región Sur del Perú ( $13^\circ\text{S}$ - $16^\circ\text{S}$ ), mostrando que en estas zonas el régimen de deformación cortical probablemente es menor o que existen períodos mayores de recurrencia para terremotos de magnitud elevada.

La sismicidad con foco a profundidad intermedia ( $60 < h \leq 350$ ) se distribuye de manera irregular, pudiendo definirse tres zonas. La primera se distribuye paralela a la línea de costa por debajo de  $9^\circ\text{S}$  y se caracteriza por la frecuente presencia de terremotos de magnitud elevada. Un segundo grupo de sismos se localiza en el interior del continente (zona Norte y Centro) a lo largo de la Cordillera Oriental y zona Subandina. Estos terremotos siguen una línea N-S y raramente producen daños. El tercer y más importante grupo, se localiza en la región Sur del Perú, siendo esta región la de mayor índice de sismicidad. En los dos primeros grupos, los sismos alcanzan profundidades del orden de 100-200 km; mientras que para el tercer grupo la profundidad máxima de los focos llega hasta 300 km. La actividad sísmica más profunda ( $h > 350$  km) se localiza en la región Centro y Sur del Llano Amazónico. Esta actividad, es mayor en la región central ( $6^\circ$ - $11^\circ\text{S}$ ) y se alinea en dirección N-S cubriendo un área de aproximadamente 500 km de longitud (borde Perú-Brasil); mientras que en la región Sur es menos numeroso y más dispersa (borde Perú-Bolivia).

Dentro del programa de Evaluación de la Peligrosidad Sísmica se propuso un mapa de peligrosidad sísmica para el Perú (Figura 2.10). Este mapa es el fruto de la cooperación entre la Universidad Nacional de Ingeniería y el CISMID. El mapa constituye un primer paso hacia una evaluación uniforme de la peligrosidad en el área. Aunque para cuestiones de análisis y diseño de las estructuras se sigue utilizando el mapa de peligrosidad sísmica de la Norma de Construcciones Sismorresistentes de Perú (NTE-030, figura 2.11) El mapa indica las aceleraciones esperadas para un período de retorno de 500 años en términos de  $a/g$ .

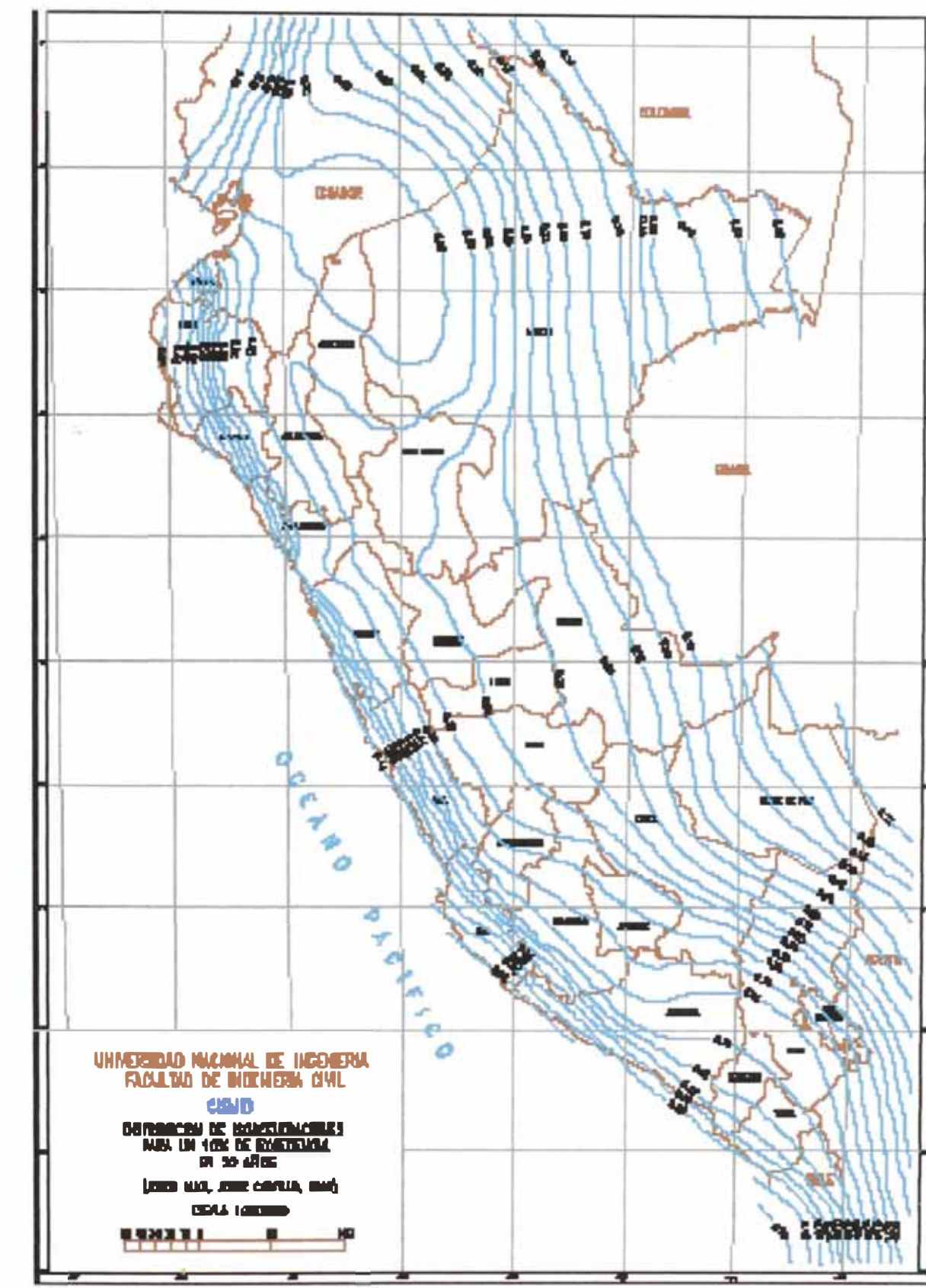


Figura 2.10 Mapa de isoaceleraciones para 50 años de vida útil



TABLA FACTORES DE ZONA	
ZONA	Z
3	0,4
2	0,3
1	0,15

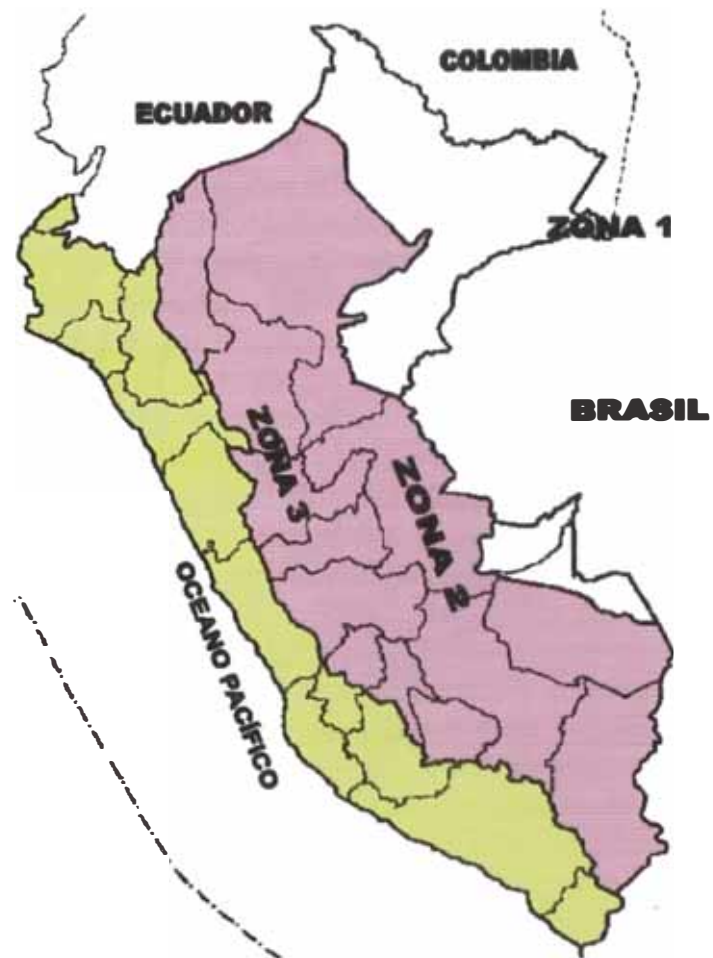


Figura 2.11 Mapa de peligrosidad sísmica del Perú para un período de retorno de 500 años de acuerdo a la Norma de Construcciones Sismorresistente del Perú de 2003 (NTE-030)

### 2.3 Evaluación de la sismicidad

Como se mencionó anteriormente, existen una gran variedad de incertidumbre en la evaluación del movimiento del terreno o en lo que un terreno específico puede generar en un sitio en particular y generalmente estas incertidumbres repercuten en la estimación de la peligrosidad sísmica del lugar. Los terremotos varían ampliamente en el tamaño o liberación de la energía, es decir, puede ser desde pequeñas fracturas a grandes deslizamientos a lo largo de varios kilómetros en una falla. Un terremoto pequeño que ocurre a pocos kilómetros de la superficie, se puede detectar sin necesidad de instrumentos, pero un terremoto grande ocurra a muchos kilómetros bajo la superficie, a veces sólo puede detectarse con ellos.

Afortunadamente en las últimas décadas ha existido un avance en la sismología teórica y computacional que ha permitido reducir esta variabilidad en la evaluación de los movimientos del terreno. El tamaño de un terremoto se puede caracterizar por la intensidad, la magnitud o por el momento sísmico (magnitud sísmica), siendo este último la caracterización más adecuada, debido a que está relacionado directamente con el producto del área de la ruptura de la falla y el desplazamiento promedio de la misma (Somerville, 2000).

## 2.3 Intensidad

En el área de la ingeniería sísmica a menudo se describen los efectos del movimiento del terremoto sobre las estructuras construidas por el hombre en términos de intensidad, es decir, de una manera subjetiva ya que no depende de medidas instrumentales, sino de la información que un observador obtenga del daño o del movimiento producido por un terremoto. Sin embargo, la naturaleza subjetiva de la intensidad sísmica crea problemas para comparar los efectos de los terremotos evaluados durante diferentes épocas de estudio ó por los efectos provocados por el terreno. Por ejemplo, valores bajos de la intensidad dependen de lo que ha sentido la gente, valores medios dependen de la respuesta de las estructuras y valores altos describen lo que ha ocurrido cuando se produce la ruptura de una falla. Una de las escalas más utilizadas para medir la intensidad sísmica es la Mercalli Modificada, a partir de la cual se han desarrollado otras en el mundo. (Anexo A).

Históricamente las escalas de intensidad tienen una importancia especial debido a que no utiliza ningún instrumento para realizar la medición. La primera vez que se utilizó el concepto de intensidad como hoy se conoce se debe a Egen, describiendo los efectos del sismo de Bélgica en 1828, sin embargo, ya se habían realizado cuantificaciones de daño un siglo antes por Shiantarelli en Italia en 1783, para el sismo de Calabria. Fue en el último cuarto de siglo XIX cuando el uso de la intensidad llegó a ser difundida ampliamente, siendo los precursores el italiano Rossi y el Suizo Forel que publicaron escalas de intensidad similares en forma reparada en 1874 y 1881, respectivamente. Posteriormente, unieron esfuerzos y elaboraron la primera escala que se utilizó internacionalmente, llamada escala Rossi – Forel con diez grados de intensidad (Arnold: Musson: JMA). Esta escala fue modificada por Mercalli, quien publicó una nueva versión considerando también diez grados. A pesar de esto no fueron suficientes para expresar el rango completo de los efectos provocados por un terremoto. Fue entonces Cancani, quien extendió la escala a doce grados, aunque omitió profundizar en cada uno de ellos. Ya en 1912, A. Sieberg, publicó la primera versión de su escala de intensidades con doce grados dando una descripción completa para cada uno de ellos, llegando a ser la base de la mayoría de las escalas modernas de intensidad con doce grados. Posteriormente, Mercalli – Cancani – Sieberg publicaron la escala MCS, realizando ligeras modificaciones respecto a la primera versión de la escala de Sieberg (actualmente esta escala se sigue utilizando en el sur de Europa). En 1931, esta escala fue traducida al inglés por Wood y Neumann, bajo el nombre de escala de Mercalli Modificada (MM). Fue mejorada completamente en 1956 por C.F. Richter, quien se abstuvo de agregar su nombre a la nueva versión, para evitar confusiones con la escala de magnitud de Richter.

En 1964, Medvedev, Sponheuer y Karnik publicaron la primera versión de la escala MSK agregando nuevos aspectos cuantitativos para hacerla más poderosa. La escala MSK se basó en la escala MCS, en las de Mercalli Modificada (MM-31 y MM-56) y en la de Medvedev elaborada en Rusia en 1953 (llamada GEOFIAN). Fue ligeramente modificada a mediados de los '70 y posteriormente en 1981, y paso a ser la escala más utilizada en Europa. En 1988, la comisión Sismológica Europea acordó iniciar una versión de la escala MSK, realizando varias reuniones de trabajo, hasta que en 1992, se decidió cambiar el nombre de MSK, por el Escala Macrosísmica Europea o EMS-92 por sus siglas en inglés “European Macroseismic Scale”. La versión final de la escala EMS se publicó en 1998, junto con las instrucciones textuales y gráficas para su uso. (Anexo A).

Otra escala de intensidad sísmica poco conocida en América y Europa, pero no por eso menos importante es la escala Japonesa de la Agencia Meteorológica de Japón, JMA (por sus siglas en Inglés “Japan Meteorological Agency”), basada en el trabajo de Omori. Esta escala formada únicamente por 7 grados, sin embargo, el grado mayor puede representar la misma intensidad de daño que el resto de las escalas.

Daño %	Rossi - Forel	Mercalli Modificada	Geofian	PRC	JMA	MSK	EMS - 98
0	I	I	I	I	I	I	I
	II	II	II	II		II	II
	III	III	III	III		III	III
	IV	IV	IV	IV	II	IV	IV
	V	V	V	V	III	V	V
	VI	VI	VI	VI	IV	VI	VI
	VII				V	VII	VII
	10	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII
	20	IX	IX	IX	VI	IX	IX
	30		X	X		X	X
	40		X	XI	XI	VII	XI
	50	XII		XII	XII		XII
70							
90							

Figura 2.12 Comparación gráfica de las diferentes escalas de intensidad utilizadas en el mundo. (NHRC, ATC-13)

En forma gráfica, las escalas mencionadas anteriormente se comparan en la figura 2.12, y se describen con mayor detalle en el Anexo A. Si se observa esta gráfica, a excepción de las escalas JMA y Rossi – Forel, el resto tienen valores muy similares, lo cual permite pensar que existe un relativo consenso en la evaluación de los efectos máximos causados por un terremoto. También, se puede observar como las escalas JMA y Rossi – Forel, aunque tienen menos grados, los máximos representan la misma intensidad de daño que el resto de las escalas.

El uso de la intensidad como medida de un terremoto, permite identificar zonas con un mismo nivel de daño y efectos similares con lo que se puede formar un mapa de isosistas. Al analizar estos mapas se puede observar que la intensidad decrece con la distancia, por lo que este fenómeno recibe el nombre de atenuación de la intensidad sísmica. Esta atenuación de la intensidad no sólo depende de la distancia o distribución geométrica, depende también de los fenómenos de absorción y dispersión de ondas, de la magnitud, de las condiciones del suelo, etc. En este contexto es posible generar mapas de peligrosidad sísmica calculando una intensidad epicentral y aplicando leyes de atenuación para el sitio en estudio como el propuesto en este trabajo.

### 2.3.2 Magnitud

El concepto de magnitud lo introdujo por primera vez el profesor Charles Richter en 1935, en California, definiéndolo como una medida cuantitativa del tamaño de un terremoto. Richter la relacionó indirectamente con la liberación de la energía la cual es independiente del lugar de observación. Actualmente, es la forma más usada para



medir el tamaño de los sismos en todo el mundo, aunque no es la única. Se calcula a partir de la medición de la amplitud en un sismógrafo del tipo Wood-Anderson de torsión y se expresa en escala logarítmica en números reales. La escala que más se utiliza es la correspondiente a la magnitud local de Richter, denotada por  $M$  ó  $M_L$  y que se define de la siguiente manera (Canas et al, 1988; Dowrick, 1997):

$$M_L = \log_{10} A - \log_{10} A_0 \quad \text{ec. 2.1}$$

En donde:

$M_L$  es la magnitud local, calculada como la diferencia entre el logaritmo decimal de la amplitud y el logaritmo decimal de la amplitud estándar.

$A$  es la amplitud máxima registrada de un terremoto a cierta distancia.

$A_0$  es un terremoto particular seleccionado como estándar.

Para evaluar  $A_0$ , se utiliza una curva propuesta por Richter que tiene la siguiente expresión:

$$\log_{10} A_0 = 6.37 - 3 \log_{10} \Delta \quad \text{ec. 2.2}$$

En donde  $\Delta$  es la distancia epicentral en Kilómetros. Sabiendo que la amplificación de la amplitud registrada era para ese caso 2800 veces la amplitud real de las partículas del terreno  $\alpha$  debidas al terremoto, se sustituye en las ecuaciones 2.1 en 2.2 y se obtiene:

$$M_L = \log_{10} \alpha + 3 \log_{10} \Delta - 2.92 \quad \text{ec.2.3}$$

Es evidente que esta ecuación sólo es válida para la zona donde fue calculada y no puede aplicarse a otras regiones. Para esto se han desarrollado otras expresiones para calcular la magnitud, entre ellas se encuentran las de magnitud superficial ( $M_s$ ), la magnitud de ondas internas ( $m_b$ ), magnitud local ( $m_l$ ).

Por otra parte, aunque la magnitud se define como una medida cuantitativa de un terremoto, las diferentes formas de medirla arrojan en algunos casos valores diferentes, esto se debe a que las escalas de magnitud fueron diseñadas en un principio para una clase específica de sismogramas y para un tipo único de ondas. Por ejemplo las ondas de superficie crean grandes alteraciones, pero únicamente en la capa superior de la Tierra, quizás a pocos kilómetros de la superficie. Los terremotos poco profundos excitan especialmente grandes superficies, mientras que los profundos casi no generan ondas en la superficie. Por lo tanto la magnitud superficial ( $M_s$ ), generalmente subestima el tamaño de los terremotos profundos. Por otra parte, la magnitud basada en las ondas internas se ha desarrollado tanto para los terremotos poco profundos como para los profundos.

### 2.3.3 Momento sísmico

El momento de un terremoto o momento sísmico  $M_0$  es quizás el mejor parámetro que puede utilizarse para medir el tamaño de un terremoto. Mientras que la magnitud es una medida conveniente del tamaño de un terremoto determinado directamente de un sismograma,  $M_0$  es una medida físicamente significativa del tamaño del terremoto

sin estar sujeta a los problemas que se encuentran en la magnitud. De hecho,  $M_0$  está directamente relacionada con los parámetros fundamentales del proceso de falla. Esta medida está siendo cada vez más usada por los sismólogos debido a su mayor fiabilidad.

La relación entre el momento sísmico y cualquiera de las diferentes magnitudes no es inmediata, pero algunos autores utilizan un ajuste logarítmico lineal del tipo:

$$\text{Log}M_0 = a + bM \quad \text{ec. 2.4}$$

### 2.3.4 mecanismo de los terremotos

La radiación de las ondas a partir del foco sísmico depende del tipo de falla que lo originan. Una forma muy conveniente para estudiar los distritos tipo de falla es a partir de la construcción de mecanismos focales. Estos pueden ser simples cuando sólo se estudia un terremoto o compuestos cuando se estudian varios asociados a un mismo tipo de falla. El modelo matemático más aceptado es el que está construido por un doble par de fuerzas sin momento resultante. La radiación de la energía desde el foco, para los distintos tipos de ondas, depende de la expresión matemática que representa el modelo correspondiente. Por ejemplo, las ondas P dan lugar a compresiones o dilataciones sobre la superficie terrestre. El mecanismo focal basado en las observaciones de dilataciones sobre la superficie terrestre. El mecanismo focal basado en las observaciones de compresiones y dilataciones en diversos observatorios se obtienen mediante la aplicación de un método gráfico que permite determinar el tipo de falla correspondiente al terremoto o a los terremotos.

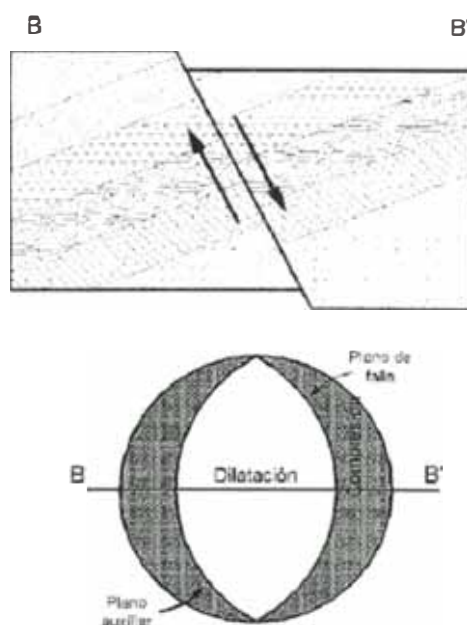


Figura 2.13 Tipo de falla de presión y mecanismo focal correspondiente (Nyffenegger, 1997)

Un ejemplo del tipo de falla con el correspondiente mecanismo focal se muestra en las figuras 2.13 y 2.14.

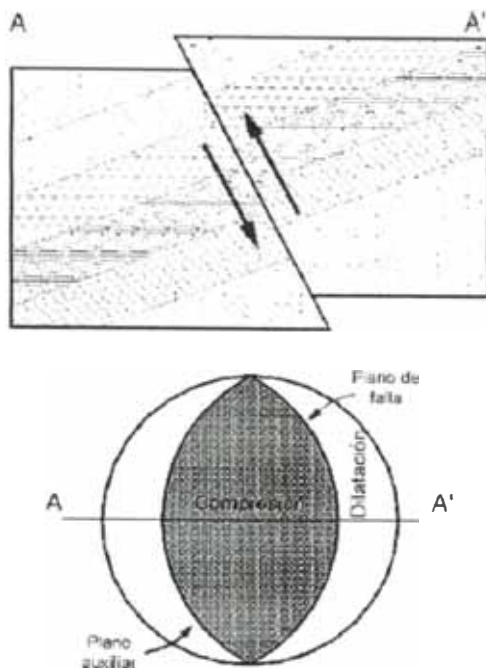


Figura 2.14 Tipo de falla normal y mecanismo focal correspondiente (Nyffenegger, 1997)

## 2.4 Vulnerabilidad sísmica

La otra parte importante para evaluar el riesgo sísmico de una región es la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras construidas por el ser humano. La experiencia ha enseñado, a través de los terremotos pasados que existen estructuras de una misma tipología que puede sufrir un mayor grado de daño debido a un terremoto a pesar de localizarse en el mismo sitio (Benedetti, et al, 1988; EERI Committee on Seismic Risk 1989; Yépez, 1996; EMS, 1998). Esto se debe a que existen estructuras con una calidad estructural mejor que otras, o en otras palabras, su vulnerabilidad es menor. Por lo tanto, se puede llegar a plantear que la vulnerabilidad sísmica de una estructura o grupo de estructuras, es la calidad estructural o capacidad de sus elementos estructurales para resistir un terremoto.

El que una estructura sea más o menos vulnerable ante un terremoto de determinadas características, es una propiedad intrínseca de cada estructura, es decir es independiente de la peligrosidad sísmica del sitio de emplazamiento, por lo tanto, una estructura puede ser vulnerable pero no estar en riesgo, a menos que se encuentre en un sitio con una cierta peligrosidad sísmica. Puede observarse, desde este punto de vista que los estudios de vulnerabilidad sísmica se pueden aplicar a cualquier obra de ingeniería civil, como son edificaciones, presas, carreteras, puentes, taludes, depósitos, centrales nucleares y, en general, a toda obra en la que se requiera conocer su comportamiento ante un posible terremoto y las consecuencias que puedan producir.

Una de las primeras tareas que hay que plantearse en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras, es el alcance que tendrán los estudios de Riesgo Sísmico. Este paso es importante, ya que la vulnerabilidad sísmica se puede evaluar de una manera muy específica realizando un estudio muy exhaustivo de las estructuras o muy general como puede ser un estudio a nivel urbano. El conocimiento del comportamiento de una estructura es generalmente complejo y dependiente de un sin número de parámetros que en su mayoría son difíciles de obtener. Algunos de estos parámetros incluyen, la obtención de las características del movimiento sísmico del

lugar, la resistencia de los materiales con los que está construida, la calidad de la construcción, la interacción con los elementos, entre otros muchos.

Sin embargo, la realización de estudios a nivel urbano, se puede reducir al conocimiento de algunos parámetros básicos para poder clasificar la estructura, o, en otras palabras al conocimiento de su calidad estructural. Normalmente, al plantear la realización de un estudio de riesgo sísmico lleva implícito la realización del estudio de grandes áreas para lo cual, los estudios a nivel urbano son lo más factibles. Por lo tanto, es oportuno aclarar que estos estudios generalmente están englobados dentro de un marco estadístico, por lo que casi todas las estimaciones de la vulnerabilidad tienen niveles significativos de incertidumbres asociados. Gran parte de esto se debe a que las estimaciones se realizan sin considerar estudios detallados en la construcción, condición y comportamiento de la estructura. A menudo, la estimación de la vulnerabilidad se realiza basada en observaciones visuales sin referencia en cálculos del comportamiento estructural.

Aunque no existe una metodología estándar o procedimiento para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras, algunas instituciones (como la Comisión de Seguridad Sísmica de California, CSSC, 1999) proponen clasificarlas en tres grupos principales, de acuerdo a:

1. **La experiencia obtenida en sismos pasados** basada en el hecho de que ciertas clases de construcciones tienden a compartir características comunes y a experimentar tipos similares de datos debidos a un terremoto. Sobre la base de esto se han desarrollado una serie de funciones de vulnerabilidad sísmica de edificios, para las cuales sólo se requiere identificar la clase de edificios para hacer referencia a la función.
2. **La experiencia obtenida en los desarrollos de ingeniería.** En este caso, los cálculos estructurales se utilizan para cuantificar la cantidad de fuerza y deformación inducida en la construcción por el movimiento del terremoto, y compararlas con la capacidad de la estructura. En ingeniería las estimaciones de la vulnerabilidad también tienden a tener incertidumbres asociadas con ellas, debido a que en ocasiones es muy difícil cuantificar la capacidad y resistencia exacta de la estructura y también la predicción de la respuesta.
3. **Una combinación de ambas,** en este caso se utilizan tanto los cálculos estructurales como la experiencia de los datos para estimar la vulnerabilidad obteniendo menos incertidumbres y permitiendo la calibración de los cálculos estructurales con el comportamiento observado de los edificios.

Una división muy parecida la realizó Dolce et al, 1994 y fue adoptada por Yépez en 1996, para el estudio de una muestra de edificios del Example de Barcelona, agregando un grupo más y refiriéndose a las metodologías como técnicas.

1. **Técnicas directas.** Estas técnicas predicen directamente el daño causado por un terremoto en una estructura y se dividen generalmente en dos principales, que son las técnicas estadísticas y los métodos mecánicos. Las técnicas estadísticas se basan en la observación y cuantificación del daño causado por un terremoto, por lo que se les denomina métodos de vulnerabilidad observada. Además estas técnicas, se consideran empíricas, debido a que

requieren simples investigaciones de campo y estudios post-terremoto, y subjetivas cuando se emplea el conocimiento y la experiencia de expertos en la evaluación del daño (Capos et al, 1995). Estos tipos de técnicas son válidos sólo en un sentido estadístico y no pueden ser aplicados a edificios individuales, pero si a la hora de evaluar la vulnerabilidad de edificios a gran escala, incluso a toda una región, donde la aplicación de otros métodos puede resultar excesivamente costosa. La desventaja es que la información obtenida mediante estos métodos se aplica únicamente al lugar de donde provienen los datos. Por otra parte, los métodos mecánicos están basados en la modelación matemática o mecánica del comportamiento de los elementos estructurales, por lo que a estos métodos se les puede denominar vulnerabilidad calculada o vulnerabilidad teórica (Singhal y Kiremidjian, 1996; Powell y Allahabadi, 1998; Petrovski, et al 1992; Nocevski y Petrovski, 1994; Aktan y Ho, 1990; Miranda, 1996).

El avance de las técnicas tanto del análisis estructural como de laboratorio, ha permitido cuantificar el grado de daño de una forma muy aproximada. Estos tipos de técnicas son muy similares a las utilizadas para la evaluación de la fiabilidad y seguridad en las estructuras, y se puede aplicar tanto a edificios individuales como a grupos de edificios. No obstante, su efectividad está limitada a estructuras cuyo comportamiento sísmico se puede describir por modelos teóricos. Una ventaja muy importante, es que suele ser la única alternativa para predecir el comportamiento sísmico de las estructuras en zonas de baja sismicidad, donde la tasa de ocurrencia de terremotos es muy baja y donde las fuentes de datos acerca del daño provocado por los sismos en diferentes tipologías de estructuras son escasas, incompletas o inexistentes, aunque por otra parte, los inconvenientes de estos métodos es su alto costo, especialmente si se quiere implementar a gran escala.

2. **Técnicas indirectas.** Estas técnicas no proporcionan directamente un daño de los edificios, sino que primero evalúa un índice de vulnerabilidad de la estructura, es decir, se evalúa primero la calidad estructural del edificio ante cargas sísmicas, para relacionarlas posteriormente con los daños, normalmente mediante estudios post-terremoto y estudios estadísticos. Estas técnicas permiten distinguir las diferencias existentes en estructuras de una misma tipología, además pueden usarse en evaluaciones sísmicas a gran escala (Asan y Sozen, 1997; Gülkan, et al 1996; Benedetti y Petrini 1984).
3. **Técnicas convencionales.** Son esencialmente heurísticas y aplicables exclusivamente a estudios de vulnerabilidad a gran escala. Introducen un índice de calidad independiente de la predicción de daño, el cual se utiliza para comparar diferentes edificios en la misma área de estudio (King et al, 1996; Rad y McCormack, 1996). Los estudios dan una medida relativa de la vulnerabilidad de un área determinada, pero son difíciles de comparar cuando se evalúan para edificios de diferentes tipologías estructurales, debido a la diferencia en los factores que se consideran en la evaluación.
4. **Técnicas híbridas.** Estas técnicas combinan características de las descritas anteriormente de acuerdo al problema que se este resolviendo. En este trabajo se usará esta técnica, ya que se utilizará la combinación de las técnicas



directas e indirectas mediante el índice de vulnerabilidad (Capos et al, 1995; Yépez, 1996).

Algunos trabajos que proponen metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica son la escala Macrosísmica Europea EMS-98 (Grünthal, 1998); las normas ATC-13, ATC-25; el método del índice de vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1984); los planes de mitigación de riesgo sísmico de Queensland (HMC); los sistemas de puntuación del índice de vulnerabilidad sísmica propuesta en el ATC-21 y utilizados por Chang et al, (1995); entre otras muchas más. *Es importante, aclarar que la elección de alguna metodología dependerá de los objetivos planteados en los estudios de Riesgo Sísmico y fundamentalmente de la información con que se cuente de los elementos de estudio.*

Un aspecto importante en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras es definir el daño que pueda sufrir una estructura debido a un terremoto. En realidad, el daño va asociado a la vulnerabilidad, ya que una estructura es más o menos vulnerable dependiendo del daño que pueda sufrir ante un terremoto. La palabra daño se utiliza ampliamente para describir distintos fenómenos que puedan ocasionar los movimientos sísmicos a las estructuras, refiriéndose principalmente al deterioro físico.

## 2.5 Daño en las edificaciones

El daño en términos generales es un concepto complejo en su interpretación y en su evaluación, o de acuerdo a la literatura el daño estructural es un fenómeno que es muy difícil modelar analíticamente o reproducir en laboratorios. El daño como se comentó antes es un fenómeno que afecta a cualquier tipo de estructura, sin embargo, a partir de ahora se hará referencia únicamente al daño que puede sufrir las edificaciones, por ser parte del objetivo de este trabajo. Para esto se clasificará el daño en tres grupos principales:

**Daño estructural.** Es evidente que el daño estructural es el de mayor importancia, ya que éste puede ocasionar que una estructura colapse o, en el mejor de los casos, que su reparación pueda ser muy costosa. El daño estructural depende del comportamiento de los elementos resistentes de una estructura como son las vigas, columnas, muros de carga, sistema de piso, y esto tiene que ver con la calidad de los materiales que componen dichos elementos, su configuración y tipo de sistema resistente y, obviamente, de las características de las cargas actuantes (Dolce, et al 1994).

La evaluación del daño se puede realizar de diferentes maneras. Una de ellas es en forma cualitativa, en la cual se establecen diferentes niveles de daño o a través de la definición de localización probable de un daño específico en una estructura. Esta forma se basa fundamentalmente en la observación e identificación de daños ocasionados, por la ocurrencia de alguna acción como por ejemplo un terremoto de determinadas características. Este procedimiento se empezó a usar hace algunos años y sigue siendo una forma viable de obtener datos reales de daño para los estudios de la vulnerabilidad en zonas urbanas. Con el desarrollo significativo de modelos de daño de los elementos estructurales, se han podido evaluar el daño en forma cuantitativa, basándose en algunos parámetros de respuesta estructural como por ejemplo, las distorsiones de piso, las deformaciones de los elementos a nivel de sección transversal y de miembro, demandas de ductilidad, de rigidez, cantidad de energía disipada, cortante de entrepiso, etc. Para medir estos parámetros se utilizan funcionales, como

una medida representativa de la degradación estructural denominados indicadores de daño. Estos indicadores pueden ser a nivel de cada elemento (indicador de daño local), o a nivel de la estructura (indicador de daño global) (Park et al, 1985; Powell y Allahabadi, 1988; Bracci et al, 1989; Kunnath, et al, 1990; Hwang y Huo, 1994; Williams y Sexsmith, 1955, Singhal y Kiremidjian, 1996).

Una forma de generalizar la medida de daño, es mediante la normalización del indicador de daño respecto a un estado de falla específica del elemento, tal que dicho estado se alcance cuando el indicador sea igual a la unidad, denominándose índice de daño. *A pesar de todos los estudios de los métodos de daño, se debe notar que la cuantificación del mismo sigue siendo complejo y por lo tanto, no existe un criterio unificado para la definición de los modelos de daño.*

**Daño no estructural.** Este tipo de daño está asociado principalmente a elementos que no forman parte del sistema resistente, como pueden ser muros divisorios, ventanales, revestimientos, etc. (Villaverde, 19997). Sin embargo, a pesar de que este tipo de daño no pone en peligro el comportamiento de la estructura, si es causada de un incremento considerable en las pérdidas económicas, como se ha podido comprobar en los sismos de Loma Prieta (1989) y Northrige (1994). El daño no estructural se evalúa generalmente mediante un índice de daño, el cual utiliza parámetros de la respuesta estructural tales como deformaciones y distorsiones que sufren los pisos de las estructuras y en ocasiones, a partir de la aceleración que experimentan los mismos.

**Daño económico.** Es una forma de relacionar el índice de daño estructural con las pérdidas económicas de un edificio debido a un sismo. Para esto se necesita evaluar el índice de daño global en términos de costes financieros, es decir, se requiere conocer un índice de daño económico global de la estructura, que agrupe los índices anteriores. Generalmente se define de la siguiente manera:

$$\text{Índice de daño económico} = \frac{\text{Coste de reparación del daño}}{\text{Coste de reposición}} \quad \text{ec.2.5}$$

En donde, el coste de reparación es una suma ponderada de los costes parciales de reparación, tanto de los elementos estructurales como no estructurales, por lo que se deben relacionar los costes con los indicadores de daño. Existen muchos investigadores que utilizan esta definición de daño económico como son: Tatsumi et al, (1992); Kappos et al, (1996) y Yépez, (1996).

En el anexo F se hace una recopilación de algunas clasificaciones de daño propuestas para estructuras, basadas en su mayoría en indicadores de daño. Estas clasificaciones se utilizarán como base para proponer los estados de daño que se utilizarán en el cálculo de los escenarios de daño de este trabajo.

## 2.6 Riesgo sísmico

Una vez revisados los conceptos de peligrosidad sísmica y vulnerabilidad sísmica se pueden observar que existe una relación directa entre ellos, es decir, para que exista verdaderamente riesgo sísmico en un lugar, ambos conceptos deben producirse y existir respectivamente, es decir, el riesgo sísmico evalúa y cuantifica las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado de la falla de las estructuras cuya capacidad resistente fue excedida.



Matemáticamente se desarrolló un marco conceptual para relacionar estos parámetros (Sandi, H., 1986), definiendo primero un Riesgo Sísmico Específico  $S$  representado como la convolución entre las probabilidades de ocurrencia de todas las intensidades posibles de los terremotos ó peligrosidad sísmica  $H$  y la vulnerabilidad sísmica de las estructuras  $V$  (ec.2.6). y el riesgo sísmico expresado como la convolución entre el valor de riesgo sísmico específico  $S$  y el valor económico de los elementos en riesgo  $E$ , (ec.2.7).

$$S = H \otimes V \quad \text{ec. 2.6}$$

$$R = S \otimes E \quad \text{ec. 2.7}$$

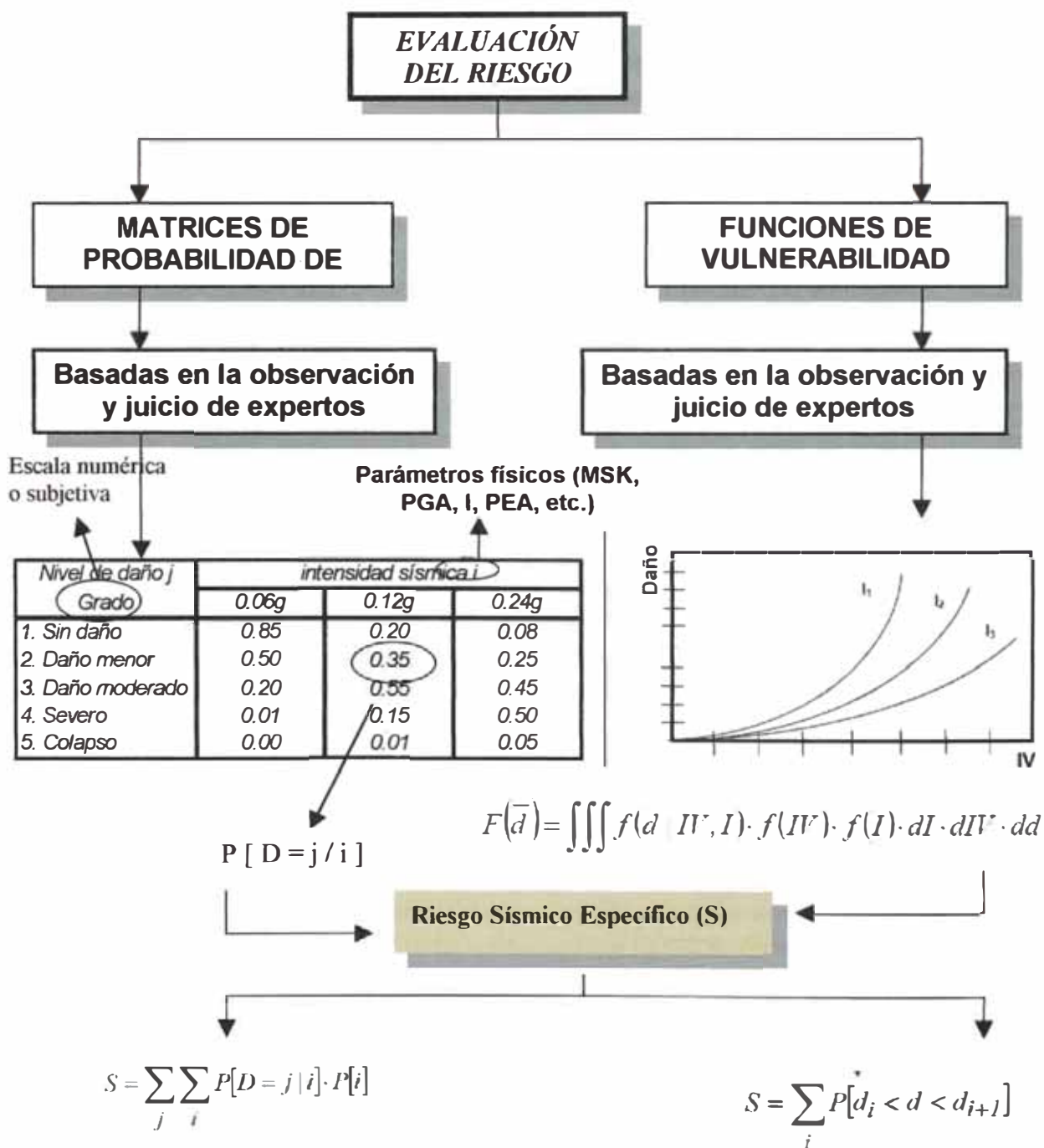


Figura 2.15. Metodología utilizada para la evaluación del Riesgo Sísmico Específico a nivel Urbano.

La mayoría de los estudios de riesgo sísmico a nivel urbano utilizan como parámetro del terremoto, la intensidad macrosísmica, la aceleración máxima o la aceleración máxima de manera indirecta, obtenida a partir de parámetros focales, como magnitud, distancia epicentral, etc., y para evaluar el riesgo sísmico, se utilizan las matrices de probabilidad o las funciones de Vulnerabilidad, obtenidas a partir de las experiencias con terremotos pasados, ó en el caso de que la actividad sísmica sea baja, mediante técnicas de simulación (Yépez, 1996). En forma esquemática, este procedimiento se muestra en la Figura 2.15, en donde las matrices de probabilidad de daño y las funciones de vulnerabilidad, se representan matemáticamente de la siguiente manera:

❖ Matrices de probabilidad de daño

$$S = \sum_j \sum_i P[D = j / i] P[i] \quad \text{ec. 2.8}$$

Donde S se expresa como la probabilidad

Donde S se expresa como la probabilidad condicional de que se produzca un nivel de daño j dado un sismo de intensidad i, multiplicando por la probabilidad de obtener dicho sismo para un período dado y todo esto para cada nivel de daño asociado a cada intensidad. De esta manera el riesgo específico S queda asociado al mismo período de retorno que el proporcionado por la peligrosidad sísmica.

❖ Funciones de vulnerabilidad

$$F(\bar{d}) = \int_0^{\bar{d}} \int_0^{I_{max}} f(d / I) \cdot f(I) \cdot dI \cdot dd \quad \text{ec. 2.9}$$

$$S = F(d_{max}) \quad \text{ec. 2.10}$$

Donde F (d) es la función de distribución de probabilidad de daño acumulado para  $d = \bar{d}$ , siempre que las variables señaladas se pueden considerar como variables aleatorias, independientes y continuas en su rango de definición. La expresión  $f(d/I)$  es la función de densidad de probabilidad de daño condicionada a la intensidad I del sismo y  $f(I)$  es la función de densidad de probabilidad de la intensidad del terremoto. Por consiguiente, el riesgo específico S vendrá dado por el valor máximo de la función de distribución de daño acumulado.

La realización de las operaciones de convolución requeridas para la evaluación del riesgo sísmico pueden ser simplificadas y optimizadas mediante la utilización de ordenadores, llegándose a poder abarcar estudios de grandes extensiones de territorios, incluyendo un manejo adecuado de las bases de datos y una sofisticada presentación de resultados, en este caso los sistemas de información geográfica (SIG) juegan un papel fundamental.

## 2.7 Estudios sobre riesgo sísmico.

Las catástrofes recientes han obligado a los gobiernos y el sector privado de todo el mundo a desarrollar estudios de riesgo sísmico para reducir los daños provocados por los terremotos. Estos estudios deben elaborarse basándose en el desarrollo del país y en la peligrosidad existente en él (Benz y Smolka, 1995). En la actualidad, existen

una gran cantidad de trabajos que tratan de evaluar el riesgo sísmico en zonas urbanas, auspiciados por organismos internacionales y gobiernos, con el fin de implementarlos dentro de sus programas de protección civil, algunos de ellos se han desarrollado como normas o recomendaciones como son:

Los de la *Comisión de Seguridad Sísmica de California* (CSSC, 1999). Este trabajo hace un repaso de los conceptos básicos de los terremotos, sus efectos típicos, las causas del daño y pérdidas debidos a ellos, la evaluación del potencial del daño en las estructuras y sistemas de equipos de la comunidad, así como aproximaciones apropiadas para la reducción del riesgo a niveles aceptables y su implementación en los planes de mitigación.

Los informes del “*Consejo de Tecnología Aplicada* (ATC-13 y ATC-25)”. Ambos trabajos fueron financiados por la Federal Emergency Management Agency (FEMA), y tienen una amplia difusión y aceptación internacional, coherencia, metodología y facilidad de uso y, por lo tanto, constituyen un a excelente referencia para orientar este tipo de estudios. El informe ATC-13 titulado “Earthquake Damage Evaluation data for California”, forma parte de un proyecto para la evaluación de daño sísmico causados por los terremotos en California. En ello se presenta información relacionada con el tema: Descripciones detalladas de la metodología empleada para clasificar la información y evaluar los daños y pérdidas por causas de los terremotos en 78 tipos de estructuras, así como evaluaciones de los tiempos estimados para restablecer los servicios interrumpidos por los terremotos, al nivel de la capacidad anterior del sismo. En cuanto al informe del ATC-25 titulado “Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of lifelines in the Conterminous United States” forma parte de un proyecto con el objetivo de obtener un mejor conocimiento del impacto de las líneas vitales durante y por causa de los terremotos y ayudar a la identificación y priorización de las medidas y estrategias para disminuir el riesgo sísmico.

*El manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado* (OEA, 1993). Este manual hace una introducción a la planificación para el impacto de los peligros naturales, mostrando cómo el impacto de estos se puede reducir, además se describen las técnicas que se usan para la evaluación del peligro, incluyendo los sistemas de información geográfica, percepción remota y técnicas especiales de cartografía. Finalmente, muestran nuevos enfoques para la evaluación y mitigación en el contexto de la planificación para el desarrollo integrado.

*Directrices para la mitigación del daño sísmico en Queensland* (HMC, 1997). El objetivo de estas directrices es asegurar que los edificios o estructuras las cuales son responsabilidad del gobierno de Queensland, tenga un comportamiento adecuado ante la ocurrencia de un terremoto, además de dar la máxima protección a las personas después de una crisis sísmica. En otras palabras, las directrices tratan de **minimizar** el riesgo de los edificios existentes, así como los de reciente construcción, utilizando métodos y estrategias de diseño sismorresistente y de mitigación, apoyados en especialitas del área.

*Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de salud* (OPS/OMS, 1999). Este documento trata específicamente a la evaluación de vulnerabilidad sísmica de los hospitales y de las metodologías para la mitigación del riesgo. Además hace referencia a las medidas que se deben tomar para la mitigación,

poniendo especial énfasis en los requisitos necesarios para que los establecimientos puedan mantener su función durante y después de un evento.

Además algunas ciudades ya cuentan con los estudios de riesgo sísmico como son las del Memphis y el condado de Shelby (Chang et al, 1995), los de la ciudad de Salt Lake (King et al, 1994), el Distrito Urbano de Niza (Thibault y Velkiv, 1995), la Bahía de San Francisco (Anagnos et al, 1996), la ciudad de México (Nassar et al, 1996), la ciudad de Lisboa (Lopes, 1996), la ciudad de Portland (Rand y McComarck, 1996), la ciudad de Barcelona (Yépez, 1996; Mena, 1997; SERGISAL, 1998; Chávez, 1998; Pujades, et al, 2000); entre otras muchas más.

El desarrollo de otras herramientas informáticas, tales como los sistemas expertos (Knowledge Based Expert Systems) o una combinación entre SIG y sistemas expertos, se están aplicando con buenos resultados al estudio de riesgo sísmico a nivel urbano (Tatsumi *et al*, 1992; OEA, 1993; King *et al*, 1994; Polovinchink et al 1995; Xie *et al*, 1996; Anagnos *et al*, 1996; Mena 1997; DERGISAL, 1998; Mena et al, 2001).

En general todos estos trabajos coinciden en la necesidad de realizar los estudios de riesgo sísmico, para poder reducir los daños causados por los terremotos debido a la falla de las estructuras. Tratan la peligrosidad sísmica como un problema difícil de predecir y aún más de reducir, sin embargo, tratan de aclarar los conceptos básicos de los terremotos y de las medidas que se tienen que tomar para hacer frente a ellos. *En cuanto a la evaluación de la vulnerabilidad, en general, todos los trabajos proponen metodologías simplificadas, basadas en índices de la vulnerabilidad o en la clasificación de las estructuras en grupos predeterminados.*

Los estudios de riesgo demuestran su potencialidad, analizando incluso otros elementos en riesgo, diferentes a las estructuras de edificación, como son líneas vitales, puentes, depósitos, instalaciones industriales, redes eléctricas, etc. Trabajos más recientes han construido un ambiente informático que es capaz de estimar las pérdidas probables de toda una zona urbana, inmediatamente después de ocurrir un terremoto fuerte. Esta información permite a las instituciones gubernamentales tomar las respectivas medidas de mitigación, para organizar y coordinar las actividades de emergencia, inmediatamente después de una crisis sísmica.

## 2.8 Mitigación del riesgo sísmico

Por mitigación del riesgo sísmico se entiende “cualquier acción preventiva que se toma antes de la ocurrencia de un fenómeno natural destructivo intentando reducir sus consecuencias”. Es decir, son todas las medidas tomadas para incrementar la resistencia y mejorar el comportamiento de los edificios y las líneas vitales para la seguridad de las personas y para la reducción de las pérdidas económicas y su impacto social (Sauter, 1996).

Como se estudio anteriormente, el cálculo del riesgo sísmico depende tanto de la peligrosidad sísmica del sitio como de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras. Evidentemente se puede observar que la peligrosidad no se puede modificar ya que es un factor que depende de la naturaleza. Sin embargo, sí se puede decidir edificar las estructuras en zonas lo suficientemente alejadas de las fallas, de rellenos, de zonas sismogénicas en general y de lugares de posibles asentamientos, deslizamientos, avalanchas o de un alto potencial de licuefacción y, de ser necesario, se estudiará la

posibilidad de utilizar técnicas de mejoramiento de las condiciones del suelo, siempre buscando disminuir la posible amplificación de la acción del terremoto.

En cuanto a la vulnerabilidad sísmica de las estructuras como se ha visto anteriormente, es un factor que se encuentra más al alcance del hombre, ya que corresponde a la calidad estructural de los edificios y en este caso sí se puede modificar utilizando un método de refuerzo cambio de uso del edificio, entre otras acciones y, en el caso de edificios nuevos, aplicando correctamente las normas sismorresistentes y utilizando materiales de buena calidad. Para el caso de edificios construidos se necesita realizar un estudio económico costo-beneficio, para decidir la factibilidad de su reforzamiento, readecuación, cambio de uso o destino, mejoramiento o demolición futura.

Otras estrategias para la mitigación del riesgo que se pueden aplicar a las zonas urbanas son evitar las grandes concentraciones en zonas cuya peligrosidad sísmica es alta. Para esto los Institutos de Estadística proporcionan datos de la zona con mayor densidad y de la evolución del crecimiento de la población, lo cual permitirá hacer planes a largo plazo, mientras que los estudios de movilidad (Marti, 2000), permitirán planes a corto plazo. Además, los resultados de los estudios del riesgo sísmico, proporcionarán las zonas donde se requieran construir centros de atención y socorro frente a catástrofes, espacios abiertos que sirvan como refugios, rutas de evacuación, rutas por donde puedan entrar los equipos de rescate, etc.

El problema en la elaboración de los programas de mitigación de desastres es sin duda la realización formal de la evaluación de los estudios de riesgo sísmico a pesar de saber que los terremotos son una causa real de desastres. Las razones se atribuyen a la ignorancia de la existencia del riesgo o al miedo correspondiente al conocer el nivel de riesgo y la obligación que tienen para reducirlo o eliminarlo. Sin embargo, el problema fundamental del manejo de riesgo sísmico no es encontrar una solución, sino encontrar la mejor solución dependiendo de las circunstancias, valores y prioridades de cada lugar de estudio y en esto la toma de decisiones es fundamental. Un ejemplo completo de un proceso de mitigación es el desarrollo por el Comité de Seguridad Sísmica de California (Figura 2.16), en el se describen los pasos principales desde la evaluación del Riesgo Sísmico, su prevención y en el caso de la ocurrencia de un terremoto del manejo de la situación (CSSC, 1999).

El proceso de la toma de decisiones que se ilustra en la Figura 2.16, está dividido en tres pasos principales:

1. *La estimación del Riesgo.* En esta etapa se define el problema, es decir, los bienes que son propensos a sufrir daño, así como un comportamiento mínimo aceptable de la estructura, para proteger la vida humana, y conservar la capacidad de la infraestructura para proveer servicios mínimos y minimizar las pérdidas económicas. Se cuantifica el riesgo base con el apoyo de técnicos, economistas, consultores para determinar el potencial de daño de vidas, heridos, pérdidas económicas o infraestructura, dependiendo de las condiciones actuales del lugar.
2. *Revisión de las alternativas de Mitigación.* Se seleccionan las bases del análisis, para determinar las restricciones bajo las cuales las instituciones podrán actuar. Una vez realizado esto se identifican las alternativas de



mitigación (reforzamiento de las estructuras, cambio de uso, etc.) Analizando la disponibilidad de recursos y restricciones se pueden descartar las alternativas que no se pueden aplicar o sean poco fiables, utilizando métodos de decisión, esto se hace apoyándose en métodos de calificación, análisis de costos – beneficios y algunas teorías de multi-atributos. Una vez elegida la alternativa se describe para implementar y después calcularla.

3. *La toma de decisiones.* En esta etapa se reúnen y organizan los datos y se estudia el costo de la implementación sobre el riesgo base de cada alternativa. Se aplica el método de decisión y se comunican los resultados, explicando la forma de obtención a las partes que deben aprobar la decisión. Normalmente la toma de decisiones no es sencilla y se necesita repetir el proceso para varias alternativas, para obtener finalmente la mejor.

Una vez seleccionada la mejor alternativa para la mitigación del Riesgo, se necesita hacer efectivo el proceso, sin embargo, para esto se requieren fondos, estrategias, recursos humanos asignados al programa que los lleve a cabo (Figura 2.17).

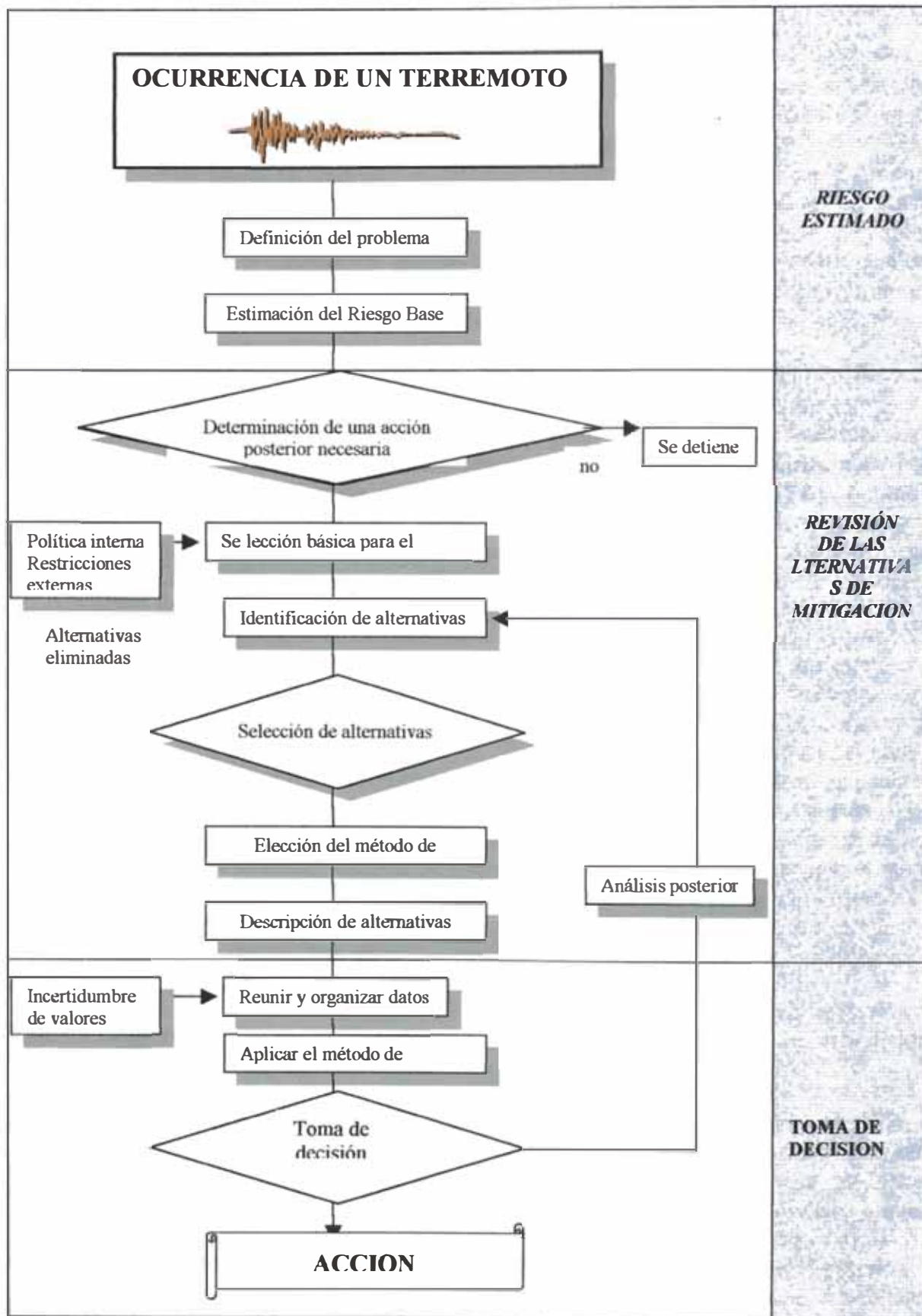


Figura 2.16. Proceso de decisión del manejo sísmico (CSSC, 1999)



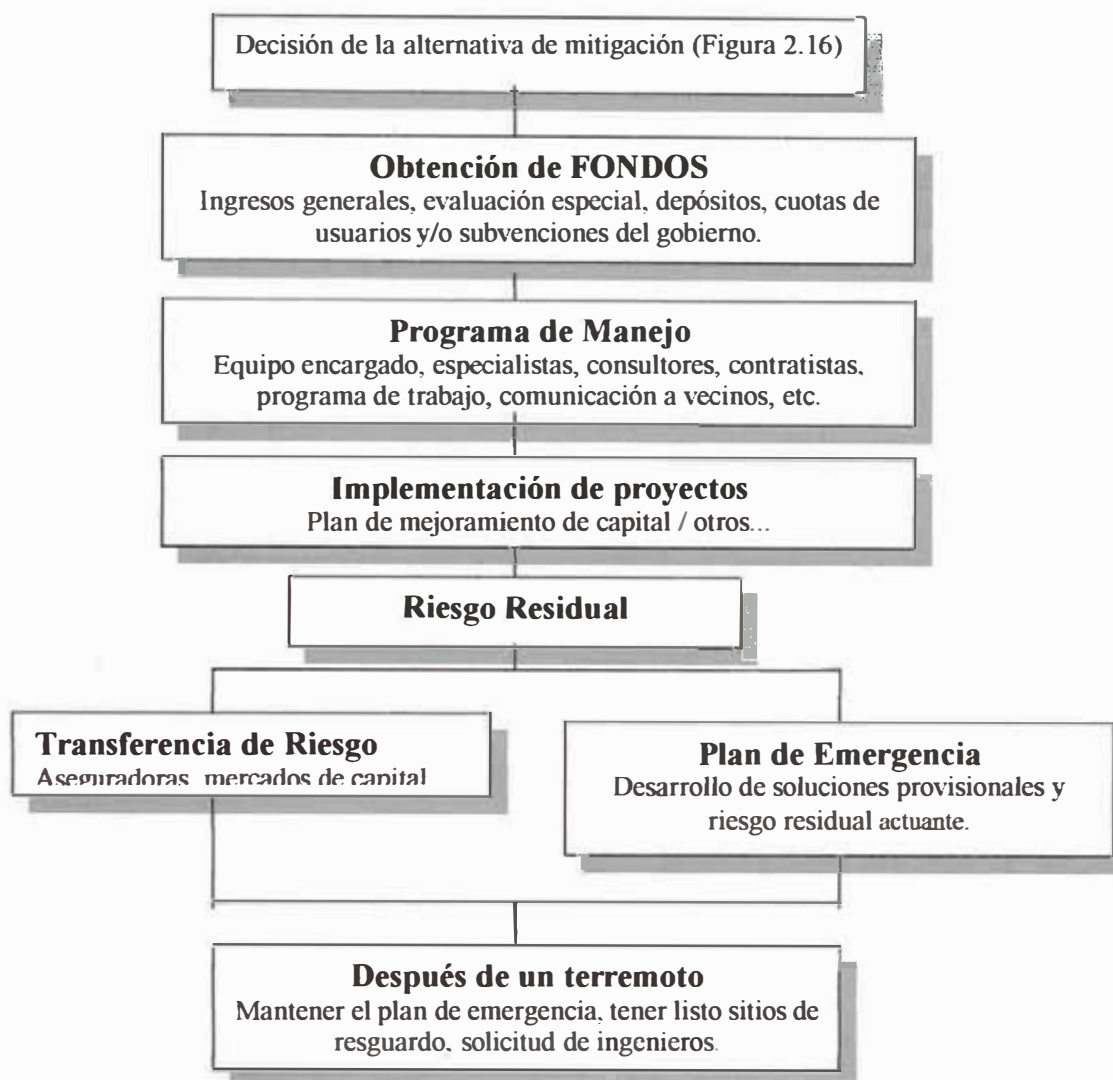


Figura 2.17. Programa de Mitigación del Riesgo Sísmico (CSSC, 1999)

## 2.9 Resumen

En este capítulo se realizó una revisión del estado del arte de los aspectos generales del riesgo sísmico, comenzando con el concepto de peligrosidad sísmica. Para esto se revisó la actividad sísmica en el mundo. Además, se revisaron a nivel regional los mapas de peligrosidad sísmica del Perú, así como a nivel local.

Dentro del concepto de la peligrosidad sísmica, se revisó además la forma de caracterizar el tamaño de un terremoto mediante la intensidad, la magnitud o el momento sísmico. Se hace una comparación de algunas de las escalas de intensidad más usadas en el mundo.

Se revisó en este trabajo la vulnerabilidad sísmica de las estructuras y de las técnicas principales que se utilizan para evaluarla. Se hace además un pequeño resumen del concepto de las estructuras por medio de matrices de vulnerabilidad sísmica o de funciones de vulnerabilidad, enmarcados dentro del concepto de riesgo sísmico y se comentaron algunos ejemplos de estudios de riesgo sísmico realizados en el mundo, cuyos resultados han servido para elaborar planes de mitigación de

desastres y en algunos casos inclusive han pasado a formar parte de las normativas sismorresistentes.

A este capítulo se complemento con el anexo A, en donde transcribe las principales escalas de intensidades usadas en el mundo; y el anexo F, donde se recopila diversas propuestas de cuantificación de los estados de daño y su descripción de los efectos en los edificios.

**CAPITULO III**  
**Vulnerabilidad sísmica**  
**de edificaciones**

### **3. VULNERABILIDAD SISMICA DE EDIFICACIONES**

#### **3.1 Introducción.**

En la actualidad el porcentaje de edificios construidos con materiales frágiles o poco dúctiles como son la mampostería, sigue siendo superior a los de concreto armado y acero, acentuándose este porcentaje en nuestro país. Estos edificios en muchos casos se encuentran expuesto a un riesgo sísmico potencial real, es decir, la ocurrencia de un terremoto provocaría inevitablemente daños en una menor o mayor medida, dependiendo de la calidad estructural de los sismos. Este fenómeno no es exclusivo de las zonas con una actividad sísmica alta, en zonas de sismicidad moderada o baja como el caso del departamento de Ayacucho, la ocurrencia de un sismo puede producir daños materiales considerables, especialmente en construcciones antiguas y en aquellos que fueron construidos sin considerar una normativa sismorresistente.

Las líneas de investigaciones actuales sobre riesgo sísmico se han enfocado al estudio del comportamiento sísmico de los edificios, gracias al importante desarrollo alcanzado en los métodos de análisis estructural y a las técnicas experimentales que permiten conocer las características mecánicas de los edificios construido, a demás del mejoramiento de las normas de diseño sismorresistente para la construcción de nuevos edificios. Sin embargo a pesar de estos avances siguen ocurriendo grandes catástrofes ocasionadas por los terremotos, debido al colapso de los edificios. Las razones pueden ser que los métodos de análisis o las normas sismorresistentes no han sido lo suficientemente eficaces para reducir el daño en los edificios o quizás que los programas de mitigación de riesgo sísmico no se han aplicado correctamente en el caso que existan. Probablemente esta última es la más factible, es decir, por la falta de planeación, las consecuencias tanto de pérdidas humanas, como de daños en los edificios han sido devastadores.

Los programas de planeación o mitigación sísmica, permiten tomar las medidas adecuadas en las zonas donde se han determinado que el riesgo sísmico es alto. Para esto se necesita que la metodología elegida para evaluar la calidad estructural o vulnerabilidad sísmica de los edificios se adecuen a los objetivos planteados en el

estudio. Es decir, aplicar metodologías detalladas implicaría costos muy elevados que en muchos casos no son viables e inclusive inadecuados, si es una zona de baja peligrosidad sísmica, sin embargo, aplicar metodologías simplificadas podría eliminar aspectos importantes para conocer el comportamiento general de un área. *Por tal motivo se eligió una metodología que no se encuentra en ninguno de los dos extremos, tratando de aprovechar las ventajas de cada uno de ellos, para realizar estudios a nivel urbano adecuados.*

### 3.2 Aspectos que afectan la vulnerabilidad sísmica

La vulnerabilidad sísmica de las viviendas depende de una serie de factores y detalles que deben evaluarse con el mayor cuidado. Estos aspectos contemplan los siguientes parámetros:

**- Aspectos Geométricos:**

Irregularidad en planta de la edificación.  
Cantidad de muros en las dos direcciones.  
Irregularidad en altura.

**- Aspectos Constructivos:**

Calidad de las juntas de pega en mortero.  
Tipo y disposición de los ladrillos.  
Calidad de los materiales.

**- Aspectos Estructuras:**

Muros confinados y reforzados.  
Detalles de columnas y vigas de confinamiento.  
Vigas de amarre y amarre de cubiertas.  
Características de las aberturas.  
Tipo y disposición del entrepiso.

**- Suelos:**

Blandos.  
Intermedios.  
Duros.

**- Entorno:**

Topografía  
Otros efectos.

### 3.3 Funciones de vulnerabilidad

La función de vulnerabilidad de una estructura es aquella que describe gráfica o matemáticamente su vulnerabilidad para varias intensidades del movimiento del terreno, siendo estas intensidades utilizadas preferiblemente por valores de algún parámetro físico, como por ejemplo, la aceleración máxima del terreno o bien por uno de los grados en cualquier escala macrosísmica.

Para cada elemento sometido a riesgo pueden determinarse, conocido el inventario de daños, relaciones entre el parámetro descriptivo de la intensidad y el nivel de daño ocurrido. Estas relaciones son las funciones de vulnerabilidad empírica, las cuales

necesitan una amplia y confiable base de información estadística. Ahora bien, si se pretende llevar a cabo estudios de costo / beneficio acerca de la efectividad relativa de intervenciones definidas por diferentes medidas posibles de mitigación del riesgo, no sólo es necesario conocer las funciones de vulnerabilidad empírica sino las funciones de vulnerabilidad teóricas o esperadas, las cuales son obtenidas de la modulación del comportamiento estructural.

Conocido el comportamiento de varios tipos de estructuras expuestas a diferentes intensidades de excitación del suelo podría realizarse una proyección o predicción de los daños esperados que pueden ocurrir en tales estructuras en futuros eventos. Por esta razón las funciones de vulnerabilidad derivadas de la estimación de las pérdidas específicas de los elementos existentes pueden utilizarse como información básica para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo en general, pues conocida la amenaza sísmica y la vulnerabilidad de las estructuras, por convolución de estas dos variables podría determinarse el riesgo sísmico.

La caracterización de los efectos, es decir el daño sísmico, usualmente se describe en términos del costo de reparación, del porcentaje de daño o de un valor que califique el nivel de pérdida específico.

También, con el fin de incluir efectos locales, se desarrollan las funciones de vulnerabilidad para diferentes tipos de suelos, por ejemplo: sobre roca, sobre arcillas volcánicas, sobre suelos aluviales, etc.

Según Aguiar, como ejemplo de funciones de vulnerabilidad Cartapati propone las curvas de regresión teórica que se muestra en la Figura 3.1. Estas curvas se definen con base en las siguientes consideraciones:

- La vulnerabilidad  $V$  se define en una escala desde 0 hasta  $\alpha$  ó si se utiliza el Índice de Vulnerabilidad  $I_v$  desde 0 hasta 382.5.
- El daño,  $D$ , se define en una escala desde 0 hasta 1.
- Cuando la vulnerabilidad es nula, el daño esperado debe ser cero.
- Cuando la vulnerabilidad tiende a  $\alpha$ , el daño debe tender a la unidad.
- Cuando la vulnerabilidad se incrementa, el daño también se incrementará.
- Cuando la vulnerabilidad es pequeña el daño esperado es casi inexistente, es decir, la curva es tangente al eje de las abscisas en el origen.

Todas las anteriores características se cumplen con una regresión del tipo:

$$D = (1 - e^{-\alpha V})^\beta, \beta > 1 \quad \text{ec. 3.1}$$

Donde los coeficientes de regresión  $\alpha$ ,  $\beta$  dependen de la intensidad sísmica de los datos analizados.

Debido a la dificultad para detectar los daños por debajo de un nivel mínimo, la curva de vulnerabilidad pierde su significado cerca al origen, por lo tanto, se debe fijar un límite mínimo bajo el cual el daño se considera inexistente. Por otro lado



considerando que los valores más elevados en una escala de daño cualquiera llevan a que se pierda funcionalidad del edificio, se debe fijar un límite máximo sobre el cual el daño se considera total.

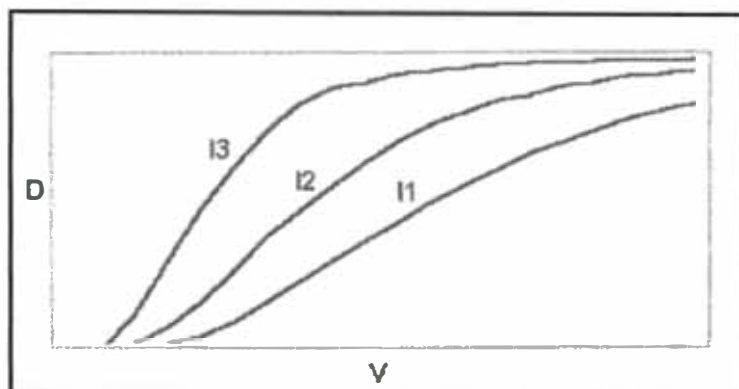


Figura 3.1 Función de vulnerabilidad teórica.

*La vulnerabilidad depende del diseño de las estructuras pero es independiente de la amenaza sísmica del sitio. Se puede decir que cada tipo de estructura tiene su propia función de vulnerabilidad y que el método para la determinación de dicha función varía en la misma forma en que el comportamiento estructural del elemento en riesgo sea distinto.*

### 3.4 Problemas asociados con los métodos expuestos

Cada tipo de metodología presentada en este capítulo para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes, exhiben dificultades que limitan el uso, para diferentes propósitos, de cada una de ellas. A continuación se muestran las dificultades que según Aguiar *et al* tienen tanto los métodos analíticos como los métodos cualitativos.

#### 3.4.1 Problemas asociados con los métodos analíticos

Los problemas asociados con los métodos analíticos, básicamente, provienen de las dificultades intrínsecas de la modelación matemática de las estructuras reales. Es importante recalcar que existen múltiples incertidumbres en la evaluación del daño, sin embargo, se pueden señalar dos de las más importantes: las hipótesis del modelo para el análisis estructural y la selección de los movimientos sísmicos del terreno.

Respecto a la primera, se puede afirmar que las propiedades actuales de los materiales y de los elementos estructurales pueden llegar a ser muy diferentes de las asumidas para el análisis y en la mayoría de los casos desconocidas. Es difícil desde un punto de vista matemático tener en cuenta el daño sufrido por la estructura antes del análisis y poder hacer una evaluación precisa de las condiciones iniciales, que permitan una evaluación confiable de la respuesta obtenida después del análisis. Además es difícil mediante un único parámetro relacionar la respuesta calculada con el daño.

Respecto a la segunda, es difícil identificar aquellas características del movimiento del terreno que describen la capacidad destructiva de un terremoto y por esta razón, el movimiento del terreno es una de las fuentes más grandes de incertidumbre. Todas

estas fuentes de incertidumbres deben ser incluidas durante la fase de interpretación probabilística de los métodos analíticos, con el objeto de deducir propiedades de daño que puedan ser aplicadas en casos reales y que dichas propiedades resulten en una evaluación confiable de la vulnerabilidad sísmica de los edificios.

Además, otro inconveniente que surge para la aplicación práctica de los métodos analíticos en los estudios de riesgo se debe al hecho que el daño usualmente se requiere en términos económicos como, por ejemplo, el índice de daño económico el cual es la relación entre el costo de reparación y el costo total de la construcción. Sin embargo, los indicadores de daño que se utilizan en estos métodos, sólo tienen en cuenta el daño de los elementos estructurales y es difícil en la práctica encontrar una correlación consistente entre dichos índices y el daño económico. Por otro lado, un elevado porcentaje de los daños económicos que se esperan por la ocurrencia de un sismo de baja a media intensidad, pueden ser debidos únicamente a los daños ocasionados en los elementos no estructurales.

Se ha llegado a obtener mediante algunos métodos, buenas correlaciones entre la respuesta medida y la respuesta simulada por el modelo. Sin embargo, el éxito de tales ensayos se debe generalmente a que las respuestas obtenidas están gobernadas por un comportamiento localizado de flexión uni-axial y no por mecanismos más complicados o difíciles de analizar en la práctica. Esto se hace posible, por ejemplo, anclando rígidamente las cimentaciones de los modelos, con lo cual se eliminan las dificultades adicionales provenientes del comportamiento suelo-estructura. También, si las cargas laterales se aplican dentro de un mismo plano de simetría, se eliminan por completo los efectos indeseables de torsión. Más aún, la mayoría de las simulaciones que se efectúan en la práctica constituyen únicamente del análisis de pórticos planos, en donde los efectos de los elementos tales como muros y escaleras, presentes en una estructura real, son ignorados.

En conclusión, debido al impreciso e incompleto entendimiento del comportamiento estructural de los edificios de concreto armado no es posible, hasta el momento, predecir analíticamente con suficiente confiabilidad la vulnerabilidad sísmica de dichas estructuras. La evaluación de estructuras por los métodos analíticos, puede llegar a ser una labor muy difícil de implementar a gran escala. Por esta razón, se siguen buscando métodos alternativos que permitan un análisis rápido de la vulnerabilidad sísmica. Sin embargo, la evaluación confiable de la vulnerabilidad de edificios muy particulares nunca podrá ser efectuada por procedimientos distintos a los métodos analíticos y es aquí donde el desarrollo de este tipo de métodos debe proseguir.

### **3.4.2 Problemas asociados con los métodos cualitativos**

Como ya se mencionó, los métodos subjetivos no permiten una evaluación precisa de la vulnerabilidad de las estructuras; sin embargo, llega a ser la única herramienta disponible en los casos para los que la modelación matemática por medio de los métodos analíticos es muy costosa, compleja o involucra factores cuyo comportamiento es difícil de predecir. En este sentido, la opinión del experto y una base de datos empíricos extensa, parece ser la solución a los problemas no resueltos hasta el momento.

La opinión subjetiva del experto, en la mayoría de los casos, resulta ser, una base de conocimiento difícil de transmitir y de "calibrar", por lo que los métodos que se basan en este tipo de información deben utilizar conceptos simples, generales y fácilmente comprensibles por el usuario. Lo anterior resulta, generalmente, en metodologías adaptadas a las tipologías y a las prácticas de construcción características de cada país e inclusive de cada región, lo que dificulta su aplicación en otros lugares.

Así, por ejemplo, los métodos que utilizan matrices de probabilidad de daño son muy apropiados porque la definición de estas matrices es generalmente sencilla y el cálculo del riesgo específico se simplifica enormemente pero, por otro lado, obliga a adoptar tipologías estructurales muy generales, las cuales son difícilmente adaptables a regiones con prácticas constructivas distintas. Además, estas tipologías por ser tan reducidas, disminuyen el nivel de "resolución" en la evaluación de la vulnerabilidad en zonas urbanas.

Por otra parte, los métodos basados en los códigos de construcción, además de no dar una estimación del daño, son elaborados con los criterios y las fórmulas adoptadas por un código de construcción en particular, lo que dificulta su adaptación para otras regiones donde, por ejemplo, el nivel de desarrollo o las políticas de protección civil son diferentes.

### **3.5 Ventajas y limitaciones de las metodologías analizadas**

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. La disponibilidad de información estructural para cada una de las viviendas, el tiempo que necesita la calibración de los modelos, entre otros factores, hicieron que estas metodologías fueran descartadas, desde un inicio, para este trabajo.

Para escoger adecuadamente una metodología cualitativa de estudio de vulnerabilidad sísmica que pudiera ser aplicada, se analizaron las ventajas y desventajas de cada una de las metodologías cualitativas. Se tomaron como parámetros básicos para esta escogencia: el tipo de información necesaria vs. disponible para desarrollarla; la facilidad para ser aplicada en una ciudad como Ayacucho donde las tipologías estructurales son variadas; la oportunidad que daba la metodología para unir esfuerzos de la oficina de Catastro Municipal, experiencias en otras ciudades donde la metodología haya sido utilizada; existencia de funciones de vulnerabilidad para la metodología, de tal forma que la vulnerabilidad de las viviendas pudiera asociarse con un probable índice de daño.

A continuación se analizan cada una de las metodologías cualitativas.

#### **3.5.1 Método del ATC – 14**

Este método fue desarrollado por el Applied Technology Council "Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings", en 1987.

Este método se basa en la identificación de los puntos débiles del edificio con base en la observación de daños en edificios similares ocurridos en eventos sísmicos previos.

### Limitaciones

- Inicialmente se identifican aquellos edificios que significan un riesgo para la vida humana. Es decir, aquellas que se clasifican como edificaciones indispensables, que deben seguir con su normal funcionamiento durante y después de un sismo.
- Evalúa los esfuerzos cortantes actuantes, los desplazamientos relativos en el entrepiso y ciertas características especiales del edificio. En el caso de muros estructurales se debe hacer una verificación de los esfuerzos de corte.

Estos dos aspectos hacen que este método sea dispendioso ya que se necesitan de herramientas básicas de ingeniería para la adquisición y correcta interpretación de los datos, limitando la recolección a personas especializadas. Además, este no es un método para estimar la vulnerabilidad a gran escala, VSG, en una zona o región, ya que primero se hace una clasificación de las estructuras que van a hacer parte de la evaluación, para luego así entrar al análisis respectivo.

Cabe mencionar, que este método no tiene en cuenta el daño producido por uno o más sismos, por lo que no predice qué tan afectada se podrá ver en el momento en que un determinado movimiento la afecte.

### 3.5.2 Método NAVFAC

Propuesto en 1988 por G. Matzamura, J. Nicoletti y S. Freeman con el nombre "Seismic Design Guidelines for Up-Grading Existing Buildings".

#### Ventajas

- Es aplicable a cualquier tipo de estructura. Realiza una estimación de un posible daño, al comparar la capacidad de la estructura que se determina por medio del coeficiente de corte basal resistente, el desplazamiento al tope de la estructura y el periodo fundamental, con la demanda del sitio.

#### Limitaciones

- Su principal problema es que no toma en cuenta la falla prematura de los elementos más débiles.

Es un método dispendioso porque involucra cálculos matemáticos y conceptos ingenieriles que no cualquier persona posee, por lo que se necesita, en el momento de la recolección, mano de obra calificada. Además, el análisis de vulnerabilidad para cada estructura conlleva un tiempo considerable, a causa de los cálculos indirectos que se deben realizar.

### 3.5.3 Métodos JAPONES

Corresponden a desarrollos basados en los trabajos de Masaya Hirosawa y compilaciones llevadas a cabo por un Comité dirigido por el Dr. H. Umemura. "Evaluation of Seismic Safety of Existing Reinforced Concrete Buildings".

**Ventajas**

- Evalúa la estructura, la forma del edificio y la peligrosidad de los elementos no estructurales. Este último aspecto es importante puesto que la mayoría de métodos sólo tienen en cuenta los elementos que hacen parte del sistema sismorresistente, olvidando la importancia que tienen los elementos no estructurales como muros, instalaciones eléctricas, sanitarias, etc. Su importancia radica, en que una de las mayores causas de muerte durante un evento sísmico es por el desprendimiento de estos elementos, muchas veces y aunque suene contradictorio, sin el daño de elementos estructurales considerables.

**Limitaciones**

- Sólo es aplicable a edificaciones de concreto reforzado de mediana y baja altura construidas mediante métodos convencionales.
- Requiere criterio especializado para el dictamen de ciertos parámetros con los que deben cumplir la estructura para poderla evaluar.

**3.5.4 Método VENEZOLANO**

Desarrollado por I. Rivera, D. Grisolia y B. Sarmiento de la Universidad de los Andes de Mérida.

**Limitaciones**

- Aplicable en edificios bajos de concreto reforzado o de mampostería.
- En el caso que no existan planos se hace un levantamiento de las dimensiones generales del edificio y de la estructura, con todas las especificaciones de los elementos resistentes a fuerzas laterales.
- Inspección detallada del edificio examinando cuidadosamente su sistema estructural, las posibles deflexiones de losas y vigas, agrietamientos, deterioro de los materiales constituyentes de estructura, conexiones y apoyos entre los elementos, etc.
- Es un método que por su alto grado de detalle en cuanto a la obtención y la manipulación de la información, no es muy práctico para un estudio de vulnerabilidad de edificaciones en gran volumen.

**3.5.5 Método FEMA-178 = FEMA-310**

FEMA-178, un procedimiento preparado por el Building Seismic Safety Council de EE.UU. Este documento presenta una guía para determinar que tan vulnerable y peligrosa (en cuanto a pérdida de vidas) es una estructura existente. Se incluye una guía en forma de lista para determinar algunas zonas o puntos débiles dentro de la estructura que podrían precipitar el colapso local o total de la estructura.

**Ventajas**

- Puede ser utilizado para llevar a cabo la evaluación y diagnóstico sísmico de cualquier edificación existente.

**Limitaciones**

- La evaluación por este método busca encontrar las deficiencias estructurales que determinan los puntos o zonas débiles y vulnerables de la estructura, para poder hacer recomendaciones de reforzamiento, implicando un minucioso conocimiento de la cantidad de refuerzo, tanto a flexión como a cortante, y su distribución, utilizando para esto los planos. Lo que implica, que si no se tiene conocimiento de ellos, se deben emplear métodos costosos para averiguar cuánto refuerzo tiene un elemento determinado, elevando el precio del estudio.
- Carece de Funciones de Vulnerabilidad para relacionar de forma continua, el daño experimentado por la estructura cuando se somete a un movimiento sísmico.

**3.5.6 Método del I.S.T.C.**

Este método ha sido desarrollado por el Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni (I.S.T.C.) y la Università degli Studi di Padova.

**Ventajas**

- Es un método que utiliza unas fichas de levantamiento de la información muy parecidas a las utilizadas por el método del Índice de Vulnerabilidad, teniendo en cuenta 7 ítems de vulnerabilidad que consideran las características geométricas y estructurales del edificio afectadas por sus respectivos pesos de acuerdo a su importancia. También utiliza Funciones de Vulnerabilidad, con la diferencia que estas funciones no sirven para estimar un daño en la estructura sino que se limita a clasificar la estructura entre un rango de vulnerabilidad específico.

El I.S.T.C. desarrolló un programa que a partir de la información recogida por las fichas de levantamiento calcula la clase de vulnerabilidad que corresponde a cada estructura y realiza un análisis estadístico para los grupos de edificios.

**Limitaciones**

- Su uso se limita a estructuras soportadas por muros de mampostería, con tipologías constructivas parecidas, es decir, mampostería reforzada de 2 a 3 pisos de altura a lo sumo, edificios contiguos o conjuntos de edificios.

**3.5.7 Metodología Propuesta por Hurtado y Cardona**

Esta metodología fue desarrollada por los ingenieros Omar Darío Cardona y Jorge Eduardo Hurtado en 1990 y es una propuesta para calcular la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de uno y dos pisos.



**Ventajas**

- A diferencia de los anteriores métodos que no estiman el daño, esta metodología lo clasifica de acuerdo a una escala que va desde el numeral uno, sin daño, hasta el numeral seis, edificación parcial o totalmente colapsada por inestabilidad.

**Limitaciones**

- No tiene en cuenta los efectos de la irregularidad en planta y en altura, aunque se podrían adaptar según las consideraciones de la Norma E-030 Diseño Sismo Resistente con los coeficientes que alteran el valor de R.

**3.5.8 Método de la AIS**

La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, ha publicado el documento "Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación Sismo Resistente de Viviendas de Mampostería", donde en su capítulo II presenta un método de evaluación del grado de vulnerabilidad sísmica de viviendas de mampostería.

**Ventajas**

- Especifica claramente los aspectos de los cuales depende la vulnerabilidad en una edificación, es decir, la geometría de la estructura, aspectos constructivos y aspectos estructurales.
- El lenguaje es claro y no tiene palabras difusas ni muy técnicas, lo que lo hace muy eficaz para la autoconstrucción o para aquellas construcciones que no van a tener a un técnico de supervisor. La autoconstrucción es una práctica muy común en Perú, y así se ha construido la gran parte del país, por lo que documentos como éste incentivan al mejoramiento de la calidad de la construcción y el comportamiento estructural sin elevar de una manera exagerada el costo de la vivienda.

**Limitaciones**

- Esta metodología no relaciona el daño sufrido por la estructura con la vulnerabilidad propiamente dicha. Sólo indica qué tan vulnerable es en una escala que va desde baja hasta alta.

**3.5.9 Método del índice de vulnerabilidad****Ventajas**

- Es un método que permite calcular la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de mampostería y aperticadas de una forma rápida y sencilla. Esta metodología se ha venido utilizando desde el año 1982, tiempo en el cual ha tenido varias modificaciones para facilitar tanto la tarea de recolección, como la de incluir una mejor descripción de los daños a medida que ocurrían eventos sísmicos.

- Las instrucciones sobre cada uno de los parámetros y sus respectivas calificaciones están descritas de forma tal que una persona con los conocimientos básicos del tema pueda llenar los formularios de una manera objetiva.
- Utiliza funciones de vulnerabilidad que relaciona el daño esperado en la edificación con la vulnerabilidad sísmica propia, lo que es muy importante para una primera aproximación en la cuantificación de las pérdidas económicas directas. Un estudio de este tipo puede indicar antes de la ocurrencia de un terremoto, a cuánto pueden ascender las pérdidas económicas, sirviendo a los dirigentes de las ciudades para la toma de decisiones respectivas.

### **Limitaciones**

- Como el método está propuesto básicamente para edificaciones europeas constituidas en algunos casos con muros de piedra, y además, teniendo en cuenta que el control de calidad en la construcción es mejor, es necesario hacer ciertas modificaciones al método, sin incurrir claro está, en la esencia propia del mismo, manteniendo los mismos 11 parámetros, pero de acuerdo con la forma y los materiales constructivos locales, modificando sus respectivos pesos y adecuándolos a las exigencias de nuestra norma.

## **3.6 Metodología escogida para el trabajo**

De los métodos presentados en este trabajo se escogió, para ser aplicado a la ciudad de Ayacucho y por ende en la zona de estudio, el método del índice de vulnerabilidad. A continuación se detallan las características que se buscaba tuviera la metodología final para este estudio, y se les compara con lo que el método italiano ofrece.

### **3.6.1 Facilidad para ser aplicada**

El método, por ser originario de Italia, podía fácilmente ser tachado de no aplicable para la ciudad de Ayacucho por las diferencias de tipología estructural que se manejan en los dos países. Una vez estudiado el método se llegó a la conclusión que sí era aplicable para la ciudad siempre y cuando se le modificaran, ampliaran y/o suprimieran ciertas características.

### **3.6.2 Credibilidad de la metodología**

La credibilidad de la metodología radica en su amplia aplicación a nivel internacional y a los resultados satisfactorios que, según Aguiar, Barbat, Caicedo y Canas (Monografías de Ingeniería Sísmica, Barcelona) ésta ha brindado.

El método del índice de vulnerabilidad ha sido ampliamente utilizado en Italia durante los últimos 18 años y su gran aceptación en este país ha quedado demostrada por el GNDT (Grupo Nazionale per la Difesa Dei Terremoti) que lo ha adoptado para los planes de mitigación de desastres a nivel gubernamental.

El proyecto europeo SERGISAI (Seismic risk evaluation through integrated use of Geographical Information Systems and Artificial Intelligence techniques) ha utilizado

este método como modelo para calcular la vulnerabilidad de los edificios europeos. La ciudad de Barcelona, por ejemplo, ha sido estudiada a través de este método y en América Latina se cuenta con el caso de Cuenca, Ecuador; así como en la ciudad de Cali, Colombia y otros.

El método proporciona, después de más de 10 años de estudio, funciones de vulnerabilidad que relacionan las aceleraciones horizontales pico del terreno y los índices de vulnerabilidad con índices de daño esperados. Esta es una gran ventaja con respecto a otros métodos puesto que no se limita a dar un número que indique la vulnerabilidad de la edificación sino que alcanza resultados del grado de daño que puede sufrir el edificio después de un sismo. Estas funciones son presentadas más adelante en este trabajo.

### 3.7 Método del índice de Vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1982)

En este trabajo se decidió aplicar la *Metodología del Índice de Vulnerabilidad* propuesta por un grupo de investigadores italianos en 1982, que fue desarrollada a partir de la información de daño en edificios provocados por terremotos desde 1976. A partir de esta información se elaboró una gran base de datos con el índice de vulnerabilidad de cada edificio y el daño sufrido por terremotos de determinada intensidad.

Algunas de las razones que se tomaron en cuenta para elegir esta metodología fueron:

- a) Esta fundamentada en datos reales.
- b) Se puede aplicar en estudios a nivel urbano.
- c) Se tiene la experiencia de haberse aplicado en diferentes ciudades del mundo con buenos resultado.
- d) Se ha aplicado en España en los sismos de Almería en 1993 y 1994 (Yépez, 1994) y Murcia en 1999 (Mena, *et al* 1999).
- e) En general se ha aplicado en diversos trabajos como los de Angeletti *et al*, 1988; Benedetti *et al*, 1988; Caicedo, 1993; Barbat *et al*, 1996; Grimaz, 1994; Yépez, 1996; Mena, 1997a; el proyecto Europeo SERGISAI, 1998; Mena *et al*, 1999, entre otros.

La metodología se desarrolló para las tipologías de mampostería y hormigón armado, poniendo un especial interés en las primeras debido a que son las construcciones con mayor porcentaje en Italia y en general en muchas partes del mundo. De esta forma, se hará una revisión de la metodología del índice de vulnerabilidad para cada tipología haciendo hincapié en los principios utilizados para su adaptación a la ciudad de Ayacucho.

#### 3.7.1 Índice de vulnerabilidad para estructuras de mampostería

El *método del índice de vulnerabilidad* (Benedetti y Petrini, 1982) identifica los parámetros más importantes que controlan el daño en los edificios causados por un terremoto. El método califica diversos aspectos de los edificios tratando de distinguir

las diferencias existentes en un mismo tipo de construcción o tipología. Esta es una ventaja sobre los métodos que clasifican las construcciones por tipología, material ó año de construcción como son el ATC-13 y las escalas de intensidad EMS-98, MSK, entre otros. Esta metodología considera aspectos como la configuración en planta y elevación, el tipo de cimentación, los elementos estructurales y no estructurales, el estado de conservación, el tipo y calidad de los materiales para evaluar los parámetros que calificados individualmente en una escala numérica (afectada por un peso  $W_i$ , que trata de enfatizar su importancia relativa en el resultado final), proporciona un valor numérico de la calidad estructural o vulnerabilidad sísmica de los edificios de hormigón. En total son once parámetros que calificados con su valor máximo se obtiene un índice de 382.5 (el valor mínimo es 0.0).

La Tabla 3.1, muestran los once parámetros considerados en la calificación de las estructuras, los valores correspondientes a los coeficientes de calificación posible  $K_i$  de acuerdo a la condición de la calidad (de A –óptimo– a D –desfavorable–) y a los factores de peso  $W_i$  asignados a cada parámetro. Los factores  $K_i$  y  $W_i$  se obtuvieron de una manera subjetiva basada en la experiencia de los investigadores y de los datos reales obtenidos en cada evento sísmico. Finalmente, el índice de vulnerabilidad global de cada edificio se evalúa utilizando la ecuación 3.2:

$$I_v = \sum_{j=1}^{11} K_j \cdot W_j \quad \text{ec. 3.2}$$

$i$	Parámetro	$K_i A$	$K_i B$	$K_i C$	$K_i D$	$W_i$
1	Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.0
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3	Resistencia convencional	0	5	25	45	1.5
4	Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75
5	Diagramas horizontales	0	5	15	45	1.0
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1.0
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1.0
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1.0

Tabla 3.1. Escala numérica del índice de vulnerabilidad  $I_v$  de los edificios de mampostería (Benedetti and Petrini, 1984).

De los valores obtenidos en los estudios post-terremoto en Italia, con respecto al índice de vulnerabilidad y daño en los edificios se obtuvieron correlaciones para diferentes intensidades, utilizando funciones de vulnerabilidad. Dichas funciones relacionan el índice de vulnerabilidad ( $I_v$ ) con un índice de daño económico global ( $ID$ ) para una intensidad dada. Un ejemplo de estas funciones se puede ver en la Figura 3.2 (Angeletti *et al*, 1988), fruto de varios análisis de los levantamientos después de los terremotos en las localidades de Venzone y Barrea en Italia y expresadas matemáticamente de la siguiente manera:

$$D = 100 \cdot \left[ \rho + k \cdot I_v + \frac{I_v^2}{I_v^2 + A^2} \right] \quad \text{ec. 3.3}$$

En donde los coeficientes  $\rho$ ,  $k$  y  $A$  se obtienen del análisis de correlación.

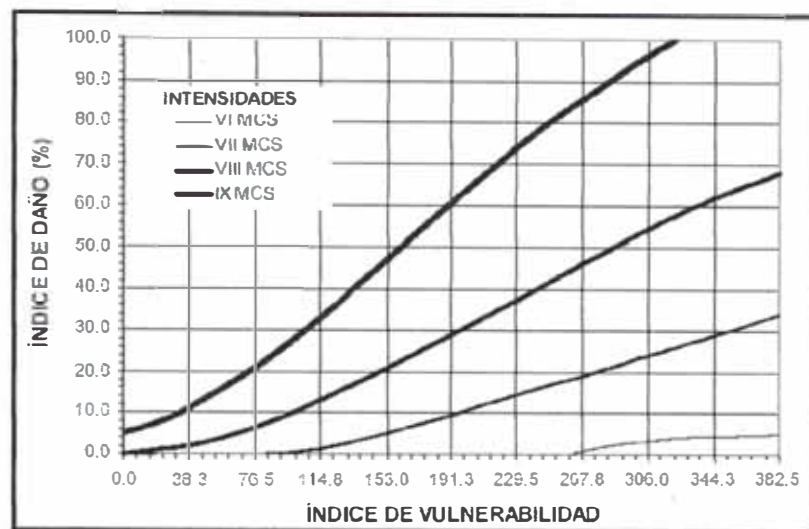


Figura 3.2. Funciones de índice de vulnerabilidad propuesta por Angeletti *et al*, 1988.

Evidentemente, estas funciones de vulnerabilidad sólo se pueden aplicar a las zonas en donde se realizó el estudio, ya que depende de factores como el tipo de material, forma constructiva, tipo de suelo y al factor subjetivo de las personas que realizan los levantamientos, entre otras razones, por lo que la aplicación directa de las funciones en algún otro sitio podría conducir a resultados erróneos e inclusive, dependiendo del objetivo del estudio peligrosos. Sin embargo, la metodología del índice de vulnerabilidad sí se puede exportar a otros sitios, en donde se requiera realizar estudios de riesgo sísmico, como ha sido el caso de España, en el que por primera vez se obtuvieron funciones de vulnerabilidad fuera de Italia utilizando dicha metodología.

El índice de vulnerabilidad se puede entender como un valor que ayuda a evaluar la falta de seguridad en los edificios ante cargas sísmicas, además forma parte de la definición de las funciones de vulnerabilidad, las cuales relacionan el índice de vulnerabilidad  $I_v$  con el índice de daño global de las estructuras. El daño observado en los edificios después de un terremoto o la simulación por ordenador del daño estructural utilizando modelos mecánicos o matemáticos, permiten deducir por medio de métodos probabilistas las funciones de vulnerabilidad. El índice de daño global  $D$ , caracterizado por el estado estructural de un edificio completo después de un sismo puede ser definido como la combinación ponderada de los valores describiendo el estado post-terremoto de los diferentes componentes estructurales tales como los elementos verticales y horizontales, los muros y los componentes no estructurales. El resultado final es el índice de daño en un rango de valores entre 0 y 100%.

### 3.7.2 Funciones de vulnerabilidad observada y simulada para edificios de mampostería

Para obtener funciones de vulnerabilidad observadas en España, se realizó un estudio post-terremoto después de la ocurrencia de dos sismos en la región de Almería, al sudoeste de España el 23 de Diciembre de 1993 y 4 de Enero de 1994, cuya intensidad máxima estimada en el sitio fue de VII en la escala MSK, cuyo uso es muy extendido en España y los países Europeos (Yépez, 1994; Barbat *et al* 1996).



El estudio empezó con el levantamiento del daño de los edificios de mampostería no reforzada y de las estructuras de hormigón afectados por los terremotos. El tipo y la extensión del daño se analizaron y clasificaron para cada parte estructural y no estructural de los edificios y se correlacionaron con el índice de daño definido por la metodología del índice de vulnerabilidad. La calidad estructural o vulnerabilidad sísmica de los edificios se evaluó siguiendo las recomendaciones de la misma metodología.

Una vez calculado el índice de vulnerabilidad y el índice de daño para cada edificio se realizó un análisis estadístico, con el cual se obtuvo una función de vulnerabilidad para los edificios de mampostería no reforzada correspondiente a una intensidad de VII en la escala MSK. En la Figura 5.3 se muestran los datos del levantamiento realizado, así como la función obtenida a partir de una regresión polinomial de grado tres, comparándola con las funciones propuestas por Angeletti *et al.*, (1988) para las intensidades VI, VII y VIII de la escala MCS (Mercalli–Cancani–Sieberg) utilizada en Italia. La comparación es posible debido a la similitud que existe entre los grados de intensidad definidos por las escalas MCS y MSK. Los resultados permitieron obtener la primera función observada de un estudio post-terremoto en España y la primera obtenida fuera de Italia utilizando el método del índice de vulnerabilidad (Yépez, 1994).

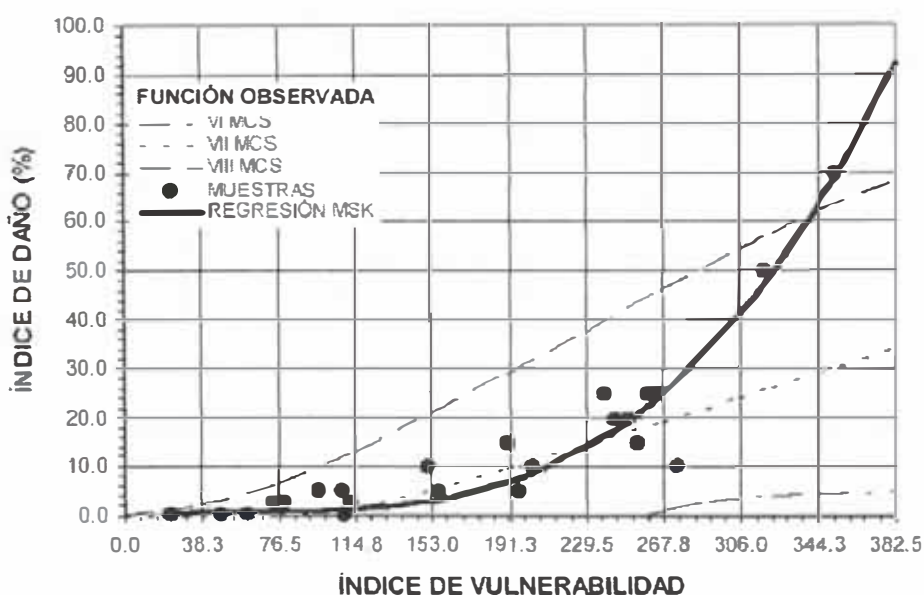


Figura 3.3. Función de vulnerabilidad observada para edificios de mampostería no reforzada en España para un nivel de intensidad de VII en la escala MSK (Yepez, 1994). Las funciones propuestas por Angeletti *et al.*, 1988 se representan por líneas discontinuas.

El levantamiento de las estructuras dañadas en la región de Almería permitió obtener sólo una función de vulnerabilidad, correspondiente a una intensidad VII en la escala MSK. Con el objeto de obtener funciones de vulnerabilidad para otros niveles de intensidad fue necesario recurrir a procesos de simulación por ordenador. El primer paso de este proceso fue simular la función de vulnerabilidad para una intensidad VII (MSK) y calibrarla con la función de vulnerabilidad observada de la Figura 3.3. Se generó de una manera aleatoria información de 60 edificios hipotéticos, respondiendo a las características reales de edificios existentes en el área de estudio. Se consideró



una ley de distribución de probabilidad uniforme para los datos. Cada parámetro que requiere la metodología italiana se estimó sobre la base de los datos generados y, de esta manera, se calculó el índice de vulnerabilidad  $I_v$ . Con los datos de los edificios se realizaron análisis estructurales con el objeto de determinar el índice de daño global para cada intensidad macrosísmica  $D$ . La relación propuesta por Chung and Shinozuka (1988) se utilizó para determinar este índice de daño global mediante una suma ponderada del índice de daño de cada piso individual normalizándolo y expresándolo como porcentaje. Con los puntos obtenidos, como se muestra en la Figura 3.4, se realizó un análisis regresional obteniendo la curva continua gruesa. Esta muestra además la función de vulnerabilidad observada.

La función ajustada a los puntos simulados en la Figura 3.4, constituye una primera iteración de un proceso para calibrar los pesos correspondientes a los 11 parámetros que intervienen en el cálculo de la vulnerabilidad de los edificios de forma que la función simulada coincida con la observada en la campaña de Almería. Después de 2 iteraciones se consiguió que la forma de las funciones observada y simulada fueran muy similares alcanzando un coeficiente de correlación del 90%. Una vez que el proceso de simulación se realizó para una intensidad VII en la escala MSK, se efectuaron varias simulaciones para intensidades VI, VIII y IX de la misma escala, utilizando los pesos  $W_i$  obtenidos en el proceso anterior. El resultado final se muestra en la Figura 3.5, en donde se muestran las cuatro curvas generadas para las intensidades consideradas anteriormente.

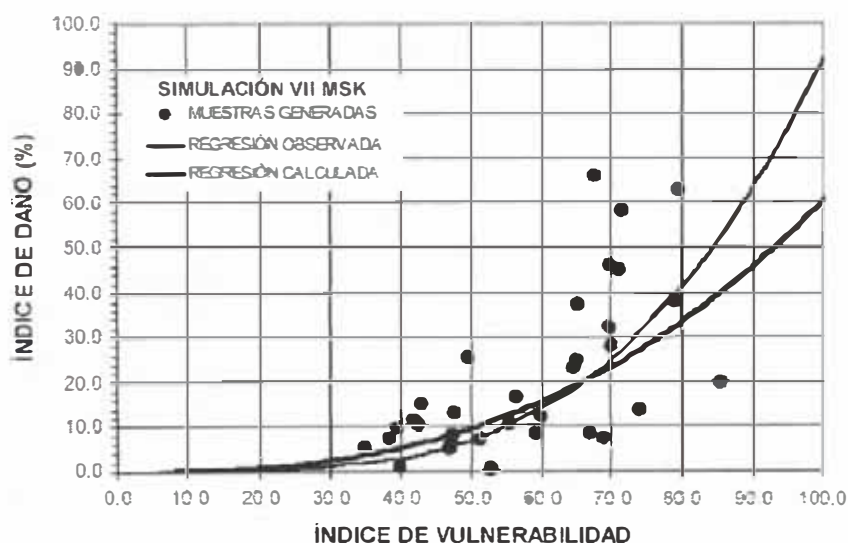


Figura 3.4. Función de vulnerabilidad simulada para intensidad VII MSK (curva gruesa) y función de vulnerabilidad observada (curva delgada). Cada punto corresponde a por lo menos un edificio generado.

Una vez que el proceso de simulación se realizó para una intensidad de VII en la escala MSK, varias simulaciones para las intensidades de VI, VIII y IX en la escala MSK se realizaron utilizando los pesos  $W_i$  calibrados obtenidos en el proceso anterior. El resultado de las funciones simuladas para las diferentes intensidades se muestra en la Figura 3.5, en donde además se superponen con las funciones de vulnerabilidad propuestas por Angeletti et al, 1988, representadas por las líneas discontinuas para observar las diferencias entre ambas regiones.

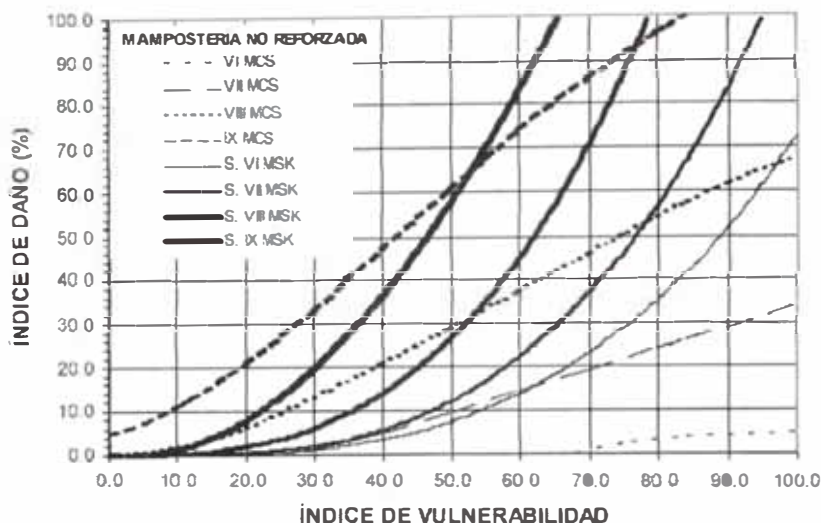


Figura 3.5. Función de vulnerabilidad para los edificios de mampostería no reforzada para diferentes niveles de intensidad en la escala MSK (Yépez, 1996). Las líneas discontinuas delgadas representan las funciones italianas propuestas por Angeletti et al. (1988).

Las funciones de vulnerabilidad obtenidas se representan por regresiones polinómicas (ec. 3.4), Cuyos coeficientes para las diferentes intensidades se muestran en la Tabla 3.2.

$$D(\%) = a_1 \cdot I_v + a_2 \cdot I_v^2 + a_3 \cdot I_v^3 \tag{ec 3.4}$$

En donde:

$a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son los coeficientes obtenidos en el cálculo de la regresión

Intensidad	$a_1$	$a_2$	$a_3$	Correlación (%)
VI	0.0048	-0.0014	0.000086	80
VII	0.0170	-0.0025	0.000140	89
VIII	-0.0047	0.0012	0.000190	88
IX	-0.1500	0.0280	-0.000039	91

Tabla 3.2. Valores de los coeficientes de las funciones de vulnerabilidad para los edificios de mampostería, obtenidos en el cálculo de la regresión polinómicas.

### 3.7.3 Funciones de vulnerabilidad simulada para edificios de hormigón armado

Para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras de hormigón armado, se utiliza un procedimiento similar al explicado anteriormente. Primero, se elabora una tabla similar a la propuesta para los edificios de mampostería considerando las características más importantes que influyen en el comportamiento sísmico de las estructuras, sin embargo, en este caso se asignan solamente tres calificaciones a diferencia de las cuatro propuestas para los edificios de mampostería. Estas calificaciones se muestran en la Tabla 3.3. Una vez evaluado cada parámetro se realiza una suma ponderada utilizando los factores de peso mostrados en la Tabla 3.3., para obtener el índice de vulnerabilidad final mediante la siguiente expresión:

$$I_v = 100 \cdot \frac{\left( \sum_{i=1}^{11} K_i \cdot W_i \right) + 1}{34} \quad \text{ec. 3.5}$$

Las funciones de vulnerabilidad simuladas para los edificios de hormigón armado se muestran en las Figuras 3.6 y 3.7. Estas funciones se generaron para dos tipos de estructuración: a) para edificios de hormigón armado con pórticos sismorresistentes y b) para edificios de hormigón armado con losas reticulares. La diferencia más importante es que los edificios del primer tipo de estructuración se comportan mejor ante un sismo que los segundos por tener una mejor capacidad de deformación, lo que permite una mayor liberación de energía.

<i>i</i>	Parámetro	$K_{i,A}$	$K_{i,B}$	$K_{i,C}$	$W_i$
1	Organización del sistema resistente	0	1	2	4.0
2	Calidad del sistema resistente	0	1	2	1.0
3	Resistencia convencional	-1	0	1	1.0
4	Posición del edificio y cimentación	0	1	2	1.0
5	Diafragmas horizontales	0	1	2	1.0
6	Configuración en planta	0	1	2	1.0
7	Configuración en elevación	0	1	3	2.0
8	Conexión entre elementos críticos	0	1	2	1.0
9	Elementos de baja ductilidad	0	1	2	1.0
10	Elementos no estructurales	0	1	2	1.0
11	Estado de conservación	0	1	2	1.0

Tabla 3.3. Escala numérica del índice de vulnerabilidad  $I_v$  para las estructuras de hormigón armado (Benedetti y Petrini 1984).

La función de vulnerabilidad correspondiente a una intensidad de VI en la escala MSK no se representa para los edificios aporticados con vigas y columnas, debido a que los índices de daño eran menores a un 5%, por lo que pueden considerarse despreciables. Para los edificios aporticados con losas y columnas los valores para una intensidad de IX no se incluyen ya que se ha calculado que en este caso la mayoría de los edificios colapsarían.

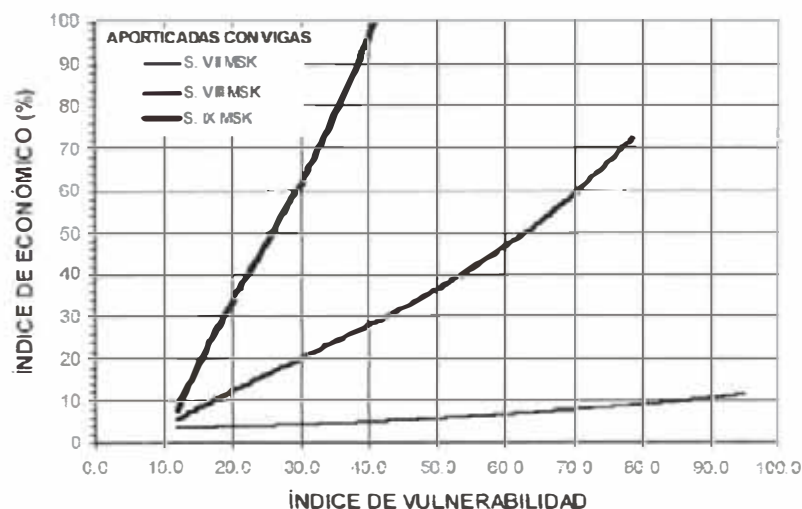


Figura 3.6. Función de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado con pórticos sismorresistentes para las intensidades VII, VIII y IX en la escala MSK (Yépez, 1996).

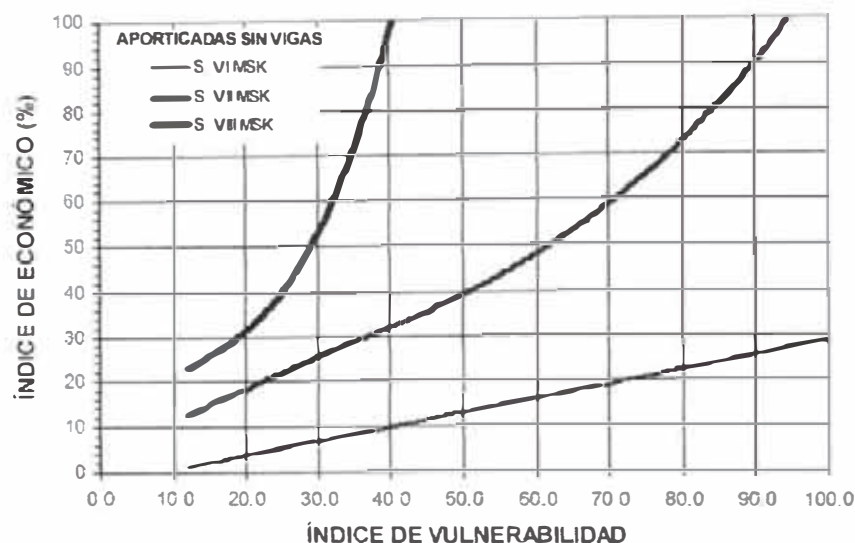


Figura 3.7. Función de vulnerabilidad para edificios de hormigón armado de losas reticulares para las intensidades VI, VII y VIII en la escala MSK (Yépez, 1996).

Finalmente, las funciones de vulnerabilidad se obtuvieron utilizando un ajuste polinomial mediante técnicas de mínimos cuadrados, cuyo resultado tienen la siguiente forma:

$$D(\%) = a + b \cdot I_v + c \cdot I_v^2 + d \cdot I_v^3 \quad \text{ec. 3.6}$$

En donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  corresponden a los coeficientes obtenidos en el cálculo de la regresión y cuyos resultados se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5.

Intensidad	$a$	$b$	$c$	$d$	$R$ (%)
VII	3.6	0.00027	0.00087	0.00	68.1
VIII	-6.1	1.1	0.0115	0.00013	96.1
IX	-49.8	6.2	-0.14	0.00191	91.5

Tabla 3.4. Valores de los coeficientes de las funciones de vulnerabilidad para los edificios de hormigón armado aporticados con vigas y columnas, obtenidos en el cálculo de las regresión polinómicas.

Intensidad	$a$	$b$	$c$	$d$	$R$ (%)
VI	-2.9	0.31	0.0	0.0	84.1
VII	1.7	1.0	-0.11	0.00012	67.1
VII	10.3	1.5	-0.63	0.002	83.7

Tabla 3.5. Valores de los coeficientes de las funciones de vulnerabilidad para los edificios de hormigón armado aporticados con losas reticulares, obtenidos en el cálculo de la regresión polinómicas.

### 3.8 Adaptación del Índice de Vulnerabilidad

Para adaptar el método del Índice de Vulnerabilidad a la ciudad de Ayacucho y particularmente al área de estudio se plantearon dos preguntas específicas:

1. ¿Los 11 parámetros planteados por el método del índice de vulnerabilidad son suficientes para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las viviendas?
2. ¿Las instrucciones que presenta el método del índice de vulnerabilidad para asignar una de las clases A, B, C, D de cada parámetro necesitan adaptarse o se pueden dejar igual que en el método original?

#### 3.8.1 Parámetros planteados para utilizar el método

El método del índice de vulnerabilidad plantea como bien se explica 11 parámetros para evaluar la vulnerabilidad sísmica de viviendas de mampostería. Con el objetivo de determinar si estos 11 parámetros eran suficientes para realizar dicha evaluación en las viviendas, se comparó con lo que el Reglamento Nacional de Construcciones propone.

Acogiendo ciertas adaptaciones a las clases de algunos parámetros, como bien se mostrará más adelante, se pudo observar que casi en su totalidad, el método del índice de vulnerabilidad satisfacía las exigencias del Reglamento Nacional de Construcciones. En la Tabla 3.6 se muestran los puntos análogos encontrados entre lo exigido por el reglamento y lo presentado por el método del índice de vulnerabilidad.

<b>COMPONENTE PROPUESTO POR EL REGLAMENTO</b>	<b>PARAMETRO ANALOGO DEL Iv: (una vez efectuadas las adaptaciones)</b>
<b>ASPECTOS GEOMETRICOS</b>	
- Irregularidad en planta de la edificación.	6. Configuración en planta.
- Cantidad de muros en las dos direcciones.	8. Distancia máxima entre los muros.
- Irregularidad en altura.	7. Configuración en elevación.
<b>ASPECTOS CONSTRUCTIVOS</b>	
- Calidad de las juntas de pega en mortero.	2. Calidad del sistema resistente.
- Tipo y disposición de las unidades de mampostería.	2. Calidad del sistema resistente.
- Calidad de las juntas de los materiales.	2. Calidad del sistema resistente.
<b>ASPECTOS ESTRUCTURALES</b>	
- Muros confinados y reforzados.	1. Organización del sistema resistente.
- Detalles de columnas y vigas de confinamiento.	----- -----
- Vigas de amarre	9. Tipo de cubierta.
- Características de las aberturas.	----- -----
- Entrepiso.	5. Diafragma horizontales.
- Amarre de cubiertas.	9. Tipo de cubierta.
<b>CIMENTACION</b>	----- -----



SUELOS	3. Resistencia convencional.
ENTORNO	4. Posición del edificio y cimentación.

Tabla 3.6: Comparación entre el Reglamento Nacional de Construcciones y los parámetros propuestos por el índice de vulnerabilidad italiano.

Se puede observar que los puntos contemplados en el Reglamento de una u otra forma, tenían un parámetro análogo en la metodología italiana.

Consecuentemente no se adicionó ningún parámetro nuevo al método original del índice de vulnerabilidad, simplemente se modificaron los ya propuestos para enriquecer el trabajo. En la Tabla 3.7 se presentan todos los parámetros que se tuvieron en cuenta para este estudio.

<b>Parámetros</b>
1. Organización del sistema resistente.
2. Calidad del sistema resistente.
3. Resistencia convencional.
4. Posición del edificio y suelos.
5. Diafragma horizontales.
6. Configuración en planta.
7. Configuración en elevación.
8. Distancia máxima entre los muros.
9. Tipo de cubierta.
10. Elementos no estructurales.
11. Estado de conservación.

Tabla 3.7: Parámetros utilizados en este estudio para el método del índice de vulnerabilidad.

### 3.8.2 Asignación de clases A, B, C, D para cada parámetro

Para asignar las clases A, B, C, D a cada uno de los parámetros de la metodología se tuvo en cuenta lo expuesto en la metodología original, las recomendaciones presentadas en el Reglamento Nacional de Construcciones, consultas a ingenieros, revisión de estudios anteriores, la información de la oficina de Catastro Municipal y visitas de campo.

A continuación se exponen las clases A, B, C, D, modificadas, ampliadas u originales de cada uno de los once parámetros ya definidos en la metodología. La asignación de las clases estará desarrollada con más detalle en los diagramas de flujo de cada parámetro presentados en el anexo E.

#### **Parámetro 1: Tipo y Organización del sistema resistente**

Para los edificios de mampostería, se evalúa el grado de organización del sistema resistente vertical de la estructura sin tomar en cuenta el material utilizado. Se enfatiza en la necesidad de tener en cuenta la presencia y eficacia de las conexiones entre los elementos resistentes verticales ortogonales, procurando de esta manera considerar la posible semejanza del comportamiento de la estructura analizada con el de una



estructura ortogonal cerrada, tipo cajón. Además, se hace un especial énfasis en el uso de una norma sismorresistente para la construcción del edificio, así como la intervención de un profesional a fin.

Para evaluar este parámetro se tomó en cuenta la norma sismorresistente de 1997 debido a que esta norma propone una mejor resistencia a las edificaciones, lo cual fue comprobado con sismos posteriores a su vigencia.

En los edificios de hormigón armado ocurre el mismo fenómeno, es decir, la aplicación de la norma sismorresistente es muy importante ya que el parámetro analiza las características del sistema resistente; también se considera la participación de un profesional a fin.

Por lo tanto, el valor del parámetro 1, se asignará de acuerdo a los puntos descritos a continuación:

### **Mampostería**

- A. Año de construcción mayor a 1997 y asesoría técnica.
- B. Que cumpla con cualquier de las siguientes condiciones:
  - 1. Año de construcción mayor a 1997, sin asesoría técnica pero Bien confinada mediante columnas y vigas de amarre o arriostramientos horizontales y verticales.
  - 2. Año de construcción menor a 1997 y asesoría técnica, pero Bien confinada mediante columnas y vigas de amarre o arriostramientos horizontales y verticales.
- C. Sin vigas de amarre en todas las plantas, está construida únicamente por paredes ortogonales bien ligadas.
- D. Edificio con paredes ortogonales no ligadas, sin vigas ni columnas.

### **Concreto Armado**

- A. Año de construcción mayor a 1997 y asesoría técnica.
- B. Año de construcción menor a 1997 y asesoría técnica.
- C. Sin asesoría técnica.

### **Parámetro 2: Calidad del sistema resistente**

En los edificios de mampostería se evalúa el tipo de material utilizado, diferenciándolo cualitativamente por su resistencia. La calificación se efectúa tomando en cuenta los siguientes factores: 1) el tipo de material utilizado así como la forma del elemento de la mampostería, y 2) la homogeneidad de dicho material y de los elementos a lo largo de los paneles que van desde piedra maciza con diferentes calidades de tallado y del ligamento entre las piezas, hasta bloques y ladrillos de arcilla o de mortero-cemento, variando entre prefabricados, ladrillos cocidos, tipo de arcilla utilizada o existencia de un leve refuerzo.

En los edificios de hormigón se evalúa de una forma similar la calidad del sistema resistente, considerando además características como la mano de obra o la calidad de ejecución que estarán evaluados por la presencia de una asistencia técnica adecuada.

En ambos tipos de edificios el parámetro se evalúa a partir de la información con que se cuenta en la base de datos, correspondiente al material utilizado en la construcción de las diferentes partes de edificio y el año de construcción, con lo que se trata de diferenciar las distintas épocas del proceso constructivo. En ambos casos el valor del parámetro se asigna de acuerdo a lo siguiente:

### **Mampostería**

- A. El sistema resistente del edificio presenta las siguientes tres características:
  - Mampostería de buena calidad y resistencia con piezas homogéneas y de dimensiones constantes por toda la extensión del muro.
  - Presencia de buen amarre entre las unidades de mampostería.
  - Mortero de buena calidad con espesor de la mayoría de las juntas continuas y homogéneas tal como mencionan las normas.
- B. El sistema resistente del edificio no presenta una de las características de la clase A.
- C. El sistema resistente del edificio no presenta dos de las características de la clase A.
- D. El sistema resistente del edificio no presenta ninguna de las características de la clase A.

### **Concreto Armado**

- A. Año de construcción mayor a 1997; buenos materiales y procesos constructivos.
- B. Año de construcción menor a 1997; buenos materiales y procesos constructivos.
- C. Materiales y procesos constructivos deficientes.

### **Parámetro 3: Resistencia convencional**

Para los edificios de mampostería se requiere cálculos sencillos pero conceptualmente importantes. Utilizando la hipótesis del comportamiento de estructura ortogonal, cerrada (tipo cajón), se puede evaluar con bastante fiabilidad la resistencia que puede presentar un edificio frente a cargas horizontales.

Para este parámetro se decidió utilizar la metodología propuesta por Hurtado y Cardona, en donde se determinó escoger la clase no por el factor  $\alpha$  como acontece con el método de índice de vulnerabilidad, sino por la demanda de ductilidad DD, que es el inverso de  $\alpha$ . Esta metodología fue desarrollada en 1990 y se desarrolla de la siguiente manera:

1. Determinar  $A_x$  y  $A_y$  que son las áreas totales resistentes de muros ( $m^2$ ) en la dirección  $x$  e  $y$  respectivamente, cuyo valor para este trabajo se inferirá de los estudios realizados (Figuras 3.8. y 3.9).

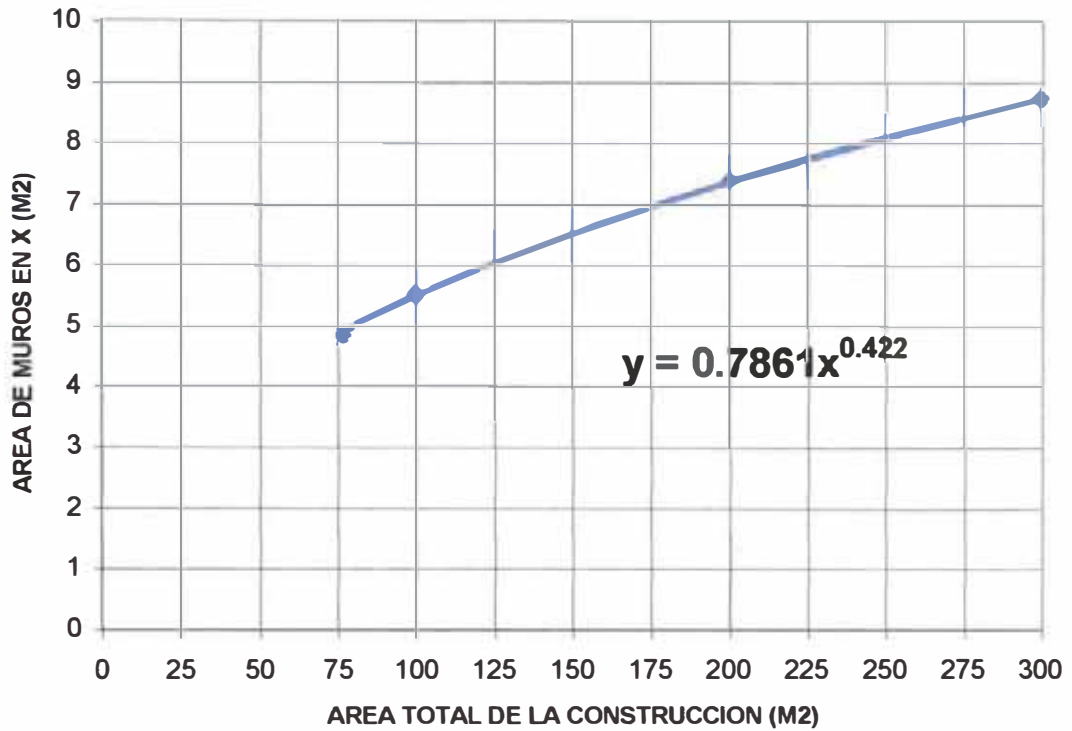


Figura 3.8 A. Área de muros de mampostería de ladrillo de arcilla, concreto y otros con un espesor promedio de 0.15 metros, en función de la dimensión en planta del edificio para el eje X

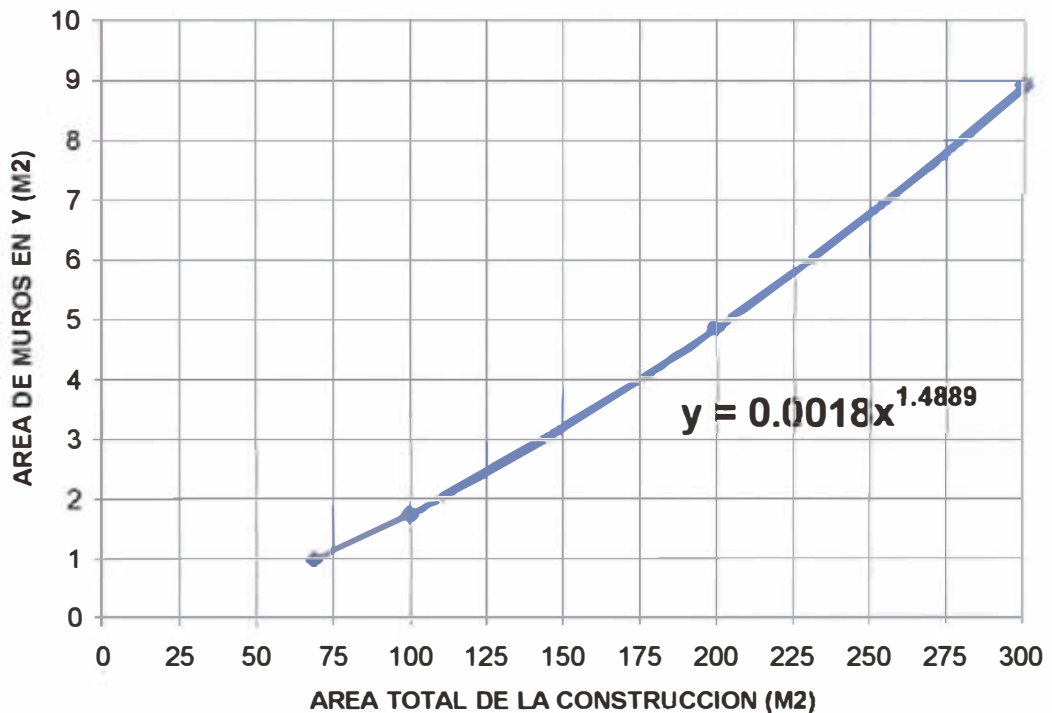


Figura 3.8 B. Área de muros de mampostería de ladrillo de arcilla, concreto y otros con un espesor promedio de 0.15 metros, en función de la dimensión en planta del edificio para el eje Y.

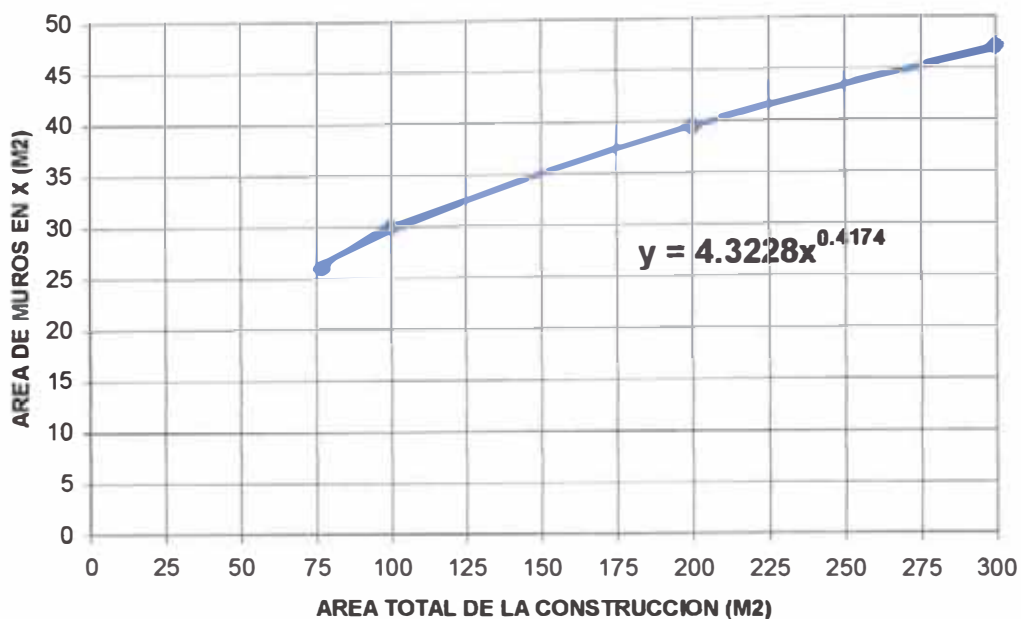


Figura 3.9 A. Área de muros de mampostería de adobe y piedra con un espesor promedio de 0.8 metros, en función de la dimensión en planta del edificio para el eje X

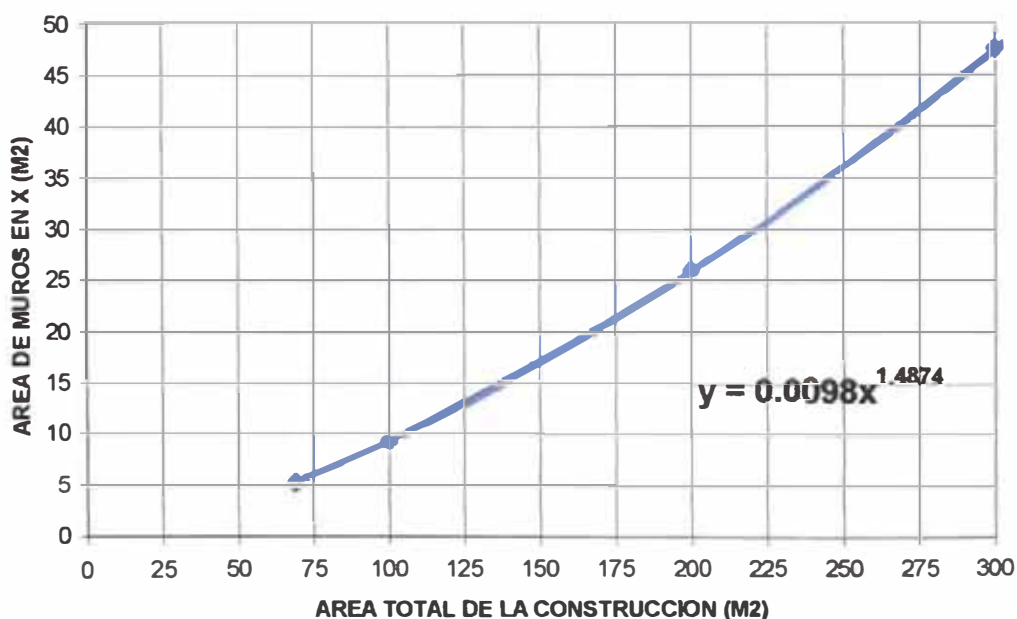


Figura 3.9 B. Área de muros de mampostería de adobe y piedra con un espesor promedio de 0.8 metros, en función de la dimensión en planta del edificio para el eje Y.

Cuando los paneles resistentes no siguen las direcciones ortogonales  $x$  o  $y$ , sino que forman un ángulo  $\beta$  diferente de cero con dichos ejes, los valores de  $A_x$  y de  $A_y$  se evalúan multiplicando dichas áreas por  $(\cos \beta)^2$ .

2. Determinar la resistencia cortante menos favorable, considerando la menor área de muros en un plano en el primer piso de la edificación. La resistencia cortante se calcula como:

$$VR = \min(A_x, A_y) \cdot v$$

ec. 3.7

donde  $v$  es el valor de la resistencia a cortante de los muros, cuyo valor se calcula de ensayos experimentales de muestras de los edificios de estudio. Cuando este valor no se obtiene experimentalmente, se pueden recurrir a los valores que se muestran en la Tabla 3.8 y 3.9.

Propiedades mecánicas de algunos tipos de mampostería de edificios históricos.				
Material	Peso Volumétrico t/m <sup>3</sup>	Resistencia a compresión	Resistencia a cortante Kg/cm <sup>2</sup>	Modulo de elasticidad
Adobe	1.8	2-5	0.5	3000
Bloques de tepetate con mortero de lodo	1.8	5-10	0.5	5000
Ladrillo con mortero de lodo	1.6	5-10	1.0	5000
Ladrillo con mortero de cal	1.6	15-20	2.0	10000
Mampostería de piedra irregular con mortero de cal	2.0	10-15	0.5	5000
Mampostería de piedra de buena calidad	2.0	30	2.0	20000
Resistencia y módulos, en Kg/cm <sup>2</sup> Las propiedades indicadas representan valores conservadores entre los encontrados en la literatura.				

Fuente: (Ingeniería Estructural de los edificios históricos. Roberto Meli, México)

Tabla 3.8. Valores recomendados de esfuerzo cortante máximo para mampostería de edificios históricos.

Así como también se pueden utilizar datos del siguiente cuadro:

Tipo de material	Esfuerzo cortante (T/m <sup>2</sup> )
Ladrillo macizo, calidad regular	6 - 12
Piedra mal tallada	2
Piedra bien tallada	7 - 9
Ladrillo macizo, buena calidad	18
Bloque macizo, mortero - cemento	18
Mampostería nueva, ladrillo macizo	20
Mampostería nueva, bloque macizo	20
Mampostería nueva, ladrillo/bloque hueco	18

Tabla 3.9. Valores recomendados de esfuerzo cortante máximo para paneles de mampostería (Yépez, 1996).

Para este trabajo se utilizó los siguientes valores promedio,  $v = 15 \text{ tn/m}^2$  para mampostería confinada,  $v = 7.5 \text{ tn/m}^2$  para mampostería no confinada y  $v = 5 \text{ tn/m}^2$  para mampostería de adobe y piedra irregular  $v = 15 \text{ tn/m}^2$  para mampostería confinada.

3. Calcular el peso de la edificación que es resistido por la estructura (W), lo cual será la contribución tanto del peso de los muros, peso de los pisos y cubiertas

$$W = N.(A_x + A_y).h.p_m + M.p_s.A_t + A_c.p_c \quad \text{ec. 3.8}$$

En donde,  $A_t$  es el área total construida en planta ( $m^2$ ),  $A_x$  y  $A_y$  son las áreas totales resistentes de muros ( $m^2$ ) en la dirección  $x$  e  $y$  respectivamente,  $h$  es la altura promedio de entrepisos ( $m$ ),  $N$  es el número de pisos de la edificación,  $P_m$  es el peso específico de la mampostería ( $T/m^3$ ),  $P_s$  el peso por unidad de área del diafragma horizontal (forjados) ( $T/m^2$ ),  $M$  es el número de diafragmas horizontales,  $A_c$  es el área total de la cubierta y  $P_c$  el peso por unidad de área de l cubierta.





Para dichos cálculos se tomaron en consideración los siguientes valores:

Valores para  $P_m$ :

- Para mampostería de adobe se utilizará  $1.6 \text{ tn} / \text{m}^3$ .
- Para mampostería de ladrillo sólido se utilizará  $1.8 \text{ tn} / \text{m}^3$ .
- Para otro tipo de material como mamposterías de caliza, granito y otros se utilizó según a los pesos unitarios que proporciona la norma u otra bibliografía.

Valores para  $P_s$ :

- Para valores de aligerados se utilizará  $0.3 \text{ tn} / \text{m}^2$ .
- Para valores de diafragmas abovedados de un promedio de espesor de 0.4m. se utilizará  $0.7 \text{ tn} / \text{m}^2$ .
- Para otros valores de diafragmas horizontales se utilizará la siguiente tabla:

Forjado	Descripción del forjado	Peso ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ )	
		Rango	Promedio
	1. Viguetas de madera y entarimado.	40 – 70	55
	2. Viguetas de madera y bovedillas de yeso.	100 – 160	130
	3. Viguetas de madera y tablero de ladrillo.	60 – 140	100
	4. Viguetas metálicas y bovedillas de ladrillo.	130 – 280	205









	5. Viguetas metálicas y mortero ligero.	160 – 390	275
	6. Vigueta de hormigón y bovedillas de ladrillo.	180 – 290	235
	7. Viguetas de hormigón y bloque huecos.	100 – 180	140
	8. Losa de hormigón armado.	190 – 480	335
	9. Losa aligerada de hormigón armado.	200 – 320	260
	10. Losa de cerámica armada.	150 – 240	195

Tabla 3.10. diafragmas tipo utilizado para el cálculo de coeficiente.

Valores para  $P_c$ :

- Para valores de coberturas de teja y barro se utilizará  $0.16 \text{ tn} / \text{m}^2$ .
- Para valores de coberturas de zing se utilizará  $0.01 \text{ tn} / \text{m}^2$ .
- Para valores de coberturas de asbesto cemento se utilizará  $0.05 \text{ tn} / \text{m}^2$ .

Para el valor del área se cubierta se consideró un 20% más del área construida, debido a los aleros y pendientes que tienen las viviendas de la zona, este incremento sólo ser'a para construcciones que tienen pendiente.

4. Calcular el coeficiente sísmico resistente CSR, es decir, el porcentaje del peso de la edificación que es resistido por la estructura, como cortante horizontal en la dirección más desfavorable.

$$CSR = \frac{VR}{W} \quad \text{ec. 3.9}$$

5. Calcular el coeficiente sísmico exigido CSE el cual será el valor del espectro de aceleraciones de diseño para un período de vibración dado, tal como menciona el reglamento sismorresistente.

Para mampostería de adobe (E 080)

$$CSE = SUC \quad \text{ec. 3.10}$$

Para mampostería y pórticos de concreto armado (E 030)

$$CSE = \frac{ZUSC}{R} \quad \text{ec. 3.11}$$

6. Calcular la demanda de ductilidad DD como la relación:

$$DD = \frac{CSE}{CSR} \quad \text{ec. 3.12}$$

7. Se podrá clasificar con la siguiente adaptación:

- A)  $DD < 0.50$
- B)  $0.50 \leq DD < 1.0$
- C)  $1.0 \leq DD < 1.5$
- D)  $1.5 \leq DD$

Para los edificios de hormigón armado, requiere de cálculos estructurales simplificados, en base a una relación entre el cortante actuante en la base y el cortante resistente de la estructura. El cortante actuante se define a partir de un espectro elástico de respuesta, mientras que el cortante resistente está basado en la capacidad a cortante del sistema resistente estructural. De esta forma, la fuerza sísmica de referencia  $F$  en el piso  $n$  puede calcularse mediante la expresión:

$$F = Z.U.S.C W_i h_i \cdot \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} \quad \text{ec. 3.13}$$

Donde :  $W_i$  y  $h_i$  son el peso y la altura del piso  $i$ , respectivamente.  $Z$ ,  $U$ ,  $S$ ,  $C$  son parámetros del reglamento sismorresistente.

La evaluación del parámetro requiere del cálculo de un coeficiente  $\alpha_h$ , que representa la relación entre la fuerza resistente y la fuerza de diseño mediante las relaciones:

$$\alpha_h = \frac{VR'}{Z.U.S.C} \quad \text{ec. 3.14}$$

$$VR' = \frac{A_o \cdot \tau}{q \cdot N} \quad \text{ec. 3.16}$$

$$q = \frac{A_x + A_y}{A_t} \cdot h \cdot P_m + P_s \quad \text{ec. 3.17}$$

$$A_o = \frac{\min(A_x \cdot A_y)}{A} \quad \text{ec. 3.18}$$

Donde  $A_t$  es el área total en planta ( $m^2$ );  $A_x$  y  $A_y$  son las áreas totales de las secciones resistentes (de hormigón armado y de mampostería), en los sentidos  $x$  e  $y$  respectivamente;  $A_o$  es el valor mínimo entre  $A_x$  y  $A_y$  partido por  $A_t$ ;  $h$  es la altura

media de los pisos ( $m$ ),  $P_m$  es el peso específico de los elementos del sistema resistente ( $T/m^3$ );  $P_s$  es el peso por unidad de área del sistema resistente ( $T/m^2$ ), y  $\tau$  es la resistencia a cortante de los elementos del sistema resistente, obtenida como una ponderación entre los valores de resistencia a cortante ( $\tau_i$ ) de cada uno de los materiales que constituyen el sistema resistente estructural (en este caso, hormigón), mediante la ec. 3.19. En esta ecuación se puede apreciar que el factor de ponderación son los porcentajes relativos de las áreas contribuyentes de los elementos del sistema resistente.

$$\tau = \frac{\sum \tau_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad \text{ec. 3.19}$$

Para calcular los coeficiente  $\alpha_h$  se utilizan la altura máxima, área total construida, el material utilizado en el sistema resistente, los muros y el tipo de diafragma, así como el esfuerzo máximo a cortante, tipo de suelo y área de muros en las direcciones  $x$  e  $y$ . Por último, el calculo del parámetro para concreto armado será de la siguiente manera:

- A.  $\alpha_h \geq 1.2$
- B.  $0.6 \leq \alpha_h < 1.2$
- C.  $\alpha_h < 0.6$

#### **Parámetro 4: Posición del edificio y de la cimentación**

Para los edificios de mampostería este parámetro se evalúa mediante los trabajos de geotecnia y geofísica realizados, así como una inspección visual. Sin embargo el proceso se complica cuando la información no está organizada; no existe una metodología adecuada para analizar uno o varios fenómenos al mismo tiempo; en la aplicación de las formas de mitigación propuestas o simplemente cuando no existen las personas adecuadas para el manejo de los sistemas. Las aplicaciones del SIG en el manejo de los riesgos naturales normalmente están limitadas por la cantidad y calidad disponible de información de los elementos que se quieren estudiar y, en algunos casos, por la falta de metodologías adecuadas para los estudios. Afortunadamente, muchas instituciones, principalmente gubernamentales, han puesto un gran interés en la elaboración de esta información, mejorando y organizando los datos catastrales de las ciudades (como ejemplo, están algunos distritos de Lima). En cuanto a los edificios de hormigón armado se evalúan las misma características del terreno, considerando pendientes más pronunciadas que las de mampostería.

Por lo tanto, la evaluación del parámetro se realizará con los valores de la pendiente obtenidos al construir la cobertura de la topografía (Figura 3.10) y el tipo de suelo resultado de estudios realizados, en donde se encuentra edificada la construcción, dividido en zonas donde: suelos de capacidad portante mayores a 4 Kg/cm<sup>2</sup> (tipo 1), suelos de capacidad portante entre 2.5 Kg/cm<sup>2</sup> y 2 Kg/cm<sup>2</sup> (tipo 2) y suelos de capacidad portante entre 2.0 Kg/cm<sup>2</sup> y 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> (tipo 3); esta clasificación se realiza debido a los estudios realizados en la zona.

Como la evaluación de los puntos como: la diferencia de cotas, presencia de terraplenes y presencia de vigas de amarre en la cimentación; es difícil de evaluar, se decidió utilizar el parámetro de asistencia de un profesional técnico en la edificación ya que éste, asegurará el buen funcionamiento de la cimentación.



Figura 3.10. Mapa topográfico del área de estudio para la vulnerabilidad sísmica.

### **Mampostería**

- A. Edificio cimentado sobre terreno tipo 1 con pendiente inferior o igual al 10% o terreno tipo 2 ó 3 con pendiente inferior o igual al 5%. Presencia de un profesional a fin.
- B. Edificio cimentado sobre terreno tipo 1 con pendiente comprendida entre un 10% y un 30% o sobre terreno tipo 2 ó 3 con pendiente comprendida entre un 5% y un 20%. Presencia de un profesional a fin.
- C. Edificio cimentado sobre terreno tipo 2 ó 3 con pendiente comprendida entre un 20% y un 30% o sobre terreno tipo 1 con pendiente comprendida entre un 30% y un 50%. Ausencia de profesional a fin.
- D. Edificio cimentado sobre terreno tipo 2 ó 3 con pendiente mayor al 30% o sobre terreno tipo 1 con pendiente mayor al 50%. La diferencia máxima entre las cotas de la fundación es superior a 1 metro. Ausencia de un profesional a fin.

### **Concreto armado**

- A. Edificio cimentado sobre terreno tipo 1 con pendiente menor a 30% o sobre terreno tipo 2 ó 3 con pendiente menor a 15%; Presencia de un profesional a fin.
- B. Edificio cimentado sobre terreno tipo 2 ó 3 con pendiente comprendida entre un 15% y un 30% o sobre terreno tipo 1 con pendiente comprendida entre un 30% y un 60%. Presencia de un profesional a fin.
- C. Edificio cimentado sobre terreno tipo 2 ó 3 con pendiente mayor a 30% y sobre terreno tipo 1 con pendiente mayor a 60%. Ausencia de un profesional a fin.

### **Parámetro 5: Diafragmas horizontales (Forjados)**

En ambas construcciones (mampostería y hormigón armado), la calidad del esquema resistente del piso tiene una notable importancia al influir en el buen funcionamiento de los elementos resistentes verticales. A partir de las experiencias con terremotos pasados, se ha observado que es de singular importancia que el sistema de diafragmas horizontales se encuentre bien conectado al sistema resistente vertical, que pueda transmitir tanto las cargas verticales que soporta el edificio, como las horizontales debidas al sismo hacia los paneles y de allí a la cimentación. Cuando

dichas conexiones no se encuentran en estado aceptable, la vibración lateral de los paneles resistentes tienden a separarlos de los diafragmas horizontales, provocando la caída de estos últimos y el desarrollo de un mecanismo de falla con características de reacción en cadena con el resto del sistema; dicha reacción se producirá como consecuencia de altas cargas de impacto.

Por otro lado, la deficiencia de estas conexiones genera inestabilidad en la estructura global, perdiendo los diafragmas horizontales su capacidad de arriostrar los muros, aumentando con ello drásticamente la longitud de pandeo de los paneles y llegándose así a un debilitamiento drástico de su capacidad de recibir cargas. En resumen, este efecto podría causar el colapso total y violento de todo el edificio. Este parámetro, en ambas construcciones se calculará con la información del tipo de diafragmas horizontales y desniveles de estos, así como su tipo de conexiones.

### **Mampostería**

- A. Edificio con diafragmas que satisfacen las condiciones:
  1. Ausencia de planos a desnivel.
  2. La deformabilidad del diafragma es despreciable. (Ideal de Concreto armado).
  3. La conexión entre el diafragma y los muros es eficaz.
- B. Edificio que no cumplen con una de las condiciones pasadas.
- C. Edificio que no cumplen con dos de las condiciones pasadas.
- D. Edificio cuyos diafragmas no cumplen ninguna de las tres condiciones.

### **Concreto armado**

- A. Edificio con diafragmas que satisfacen las condiciones:
  1. Ausencia de planos a desnivel.
  2. La deformabilidad del diafragma es despreciable. (Ideal de Concreto armado).
  3. La conexión entre el diafragma y el sistema resistente es eficaz.
- B. Edificio que no cumplen con una de las condiciones pasadas.
- C. Edificio cuyos diafragmas no cumplen con dos de las condiciones pasadas.

### **Parámetro 6: Configuración en planta**

La forma y la disposición en planta de los edificios son determinantes en su comportamiento ante excitaciones sísmicas. La asignación de las calificaciones posibles se puede explicar mediante la Figura 3.11, definiendo los parámetros  $\beta_1 = a/L$  y  $\beta_2 = b/L$ , donde:

a representa la dimensión menor del edificio, L es la dimensión mayor y b la dimensión de los elementos que sobresalgan de las dimensiones principales a L de la planta.

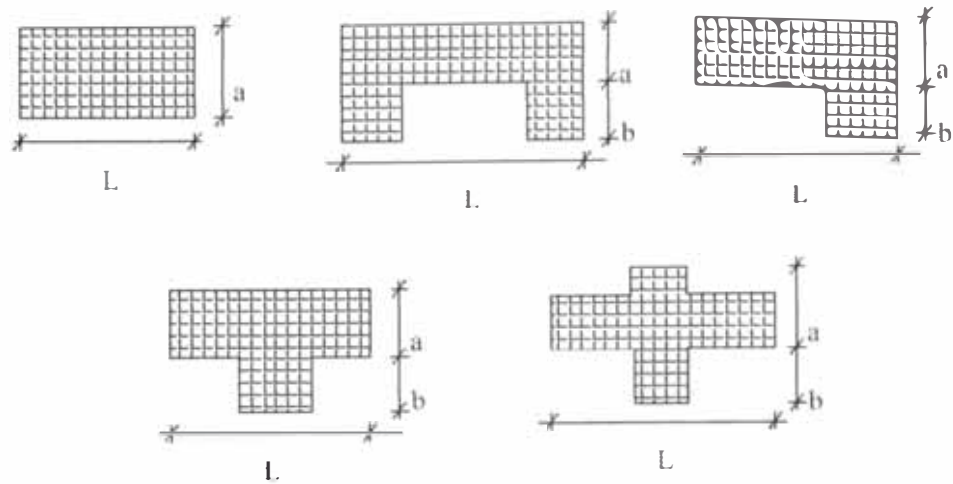


Figura 3.11. Formas originales en planta consideradas en la metodología del índice de vulnerabilidad.

El método evalúa la condición de simetría en planta de los edificios, proponiendo los valores más altos del parámetro cuando las dimensiones en planta se asemejan a secciones cuadradas, sin protuberancias adicionales y penalizándose las secciones excesivamente alargadas o con protuberancias demasiado grandes, las cuales pueden provocar problemas de torsión en planta y concentraciones de esfuerzos en las esquinas y en los elementos más alejados de los centros de gravedad y de rigidez.

La implementación de este parámetro dentro del sistema de información geográfica, impide evaluar el parámetro como lo indica la metodología original, lo que obliga a desarrollar un método alternativo para evaluar dicha regularidad. Debido a que este parámetro depende de la geometría de la planta del edificio, el método propuesto es el siguiente para ambos tipos de edificios:

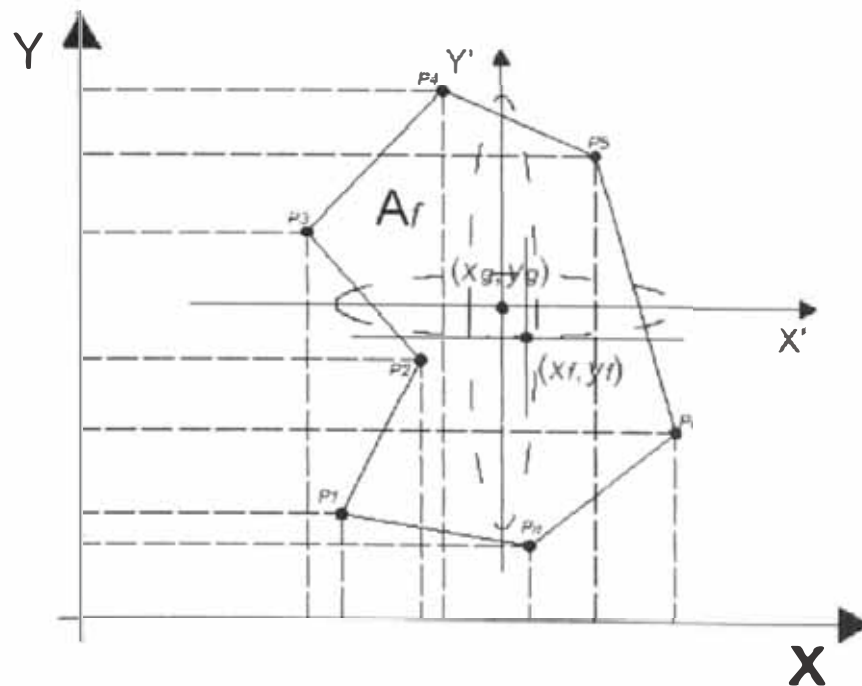


Figura 3.12. Forma general de una planta considerada para el cálculo del parámetro 6 (configuración en planta del edificio).



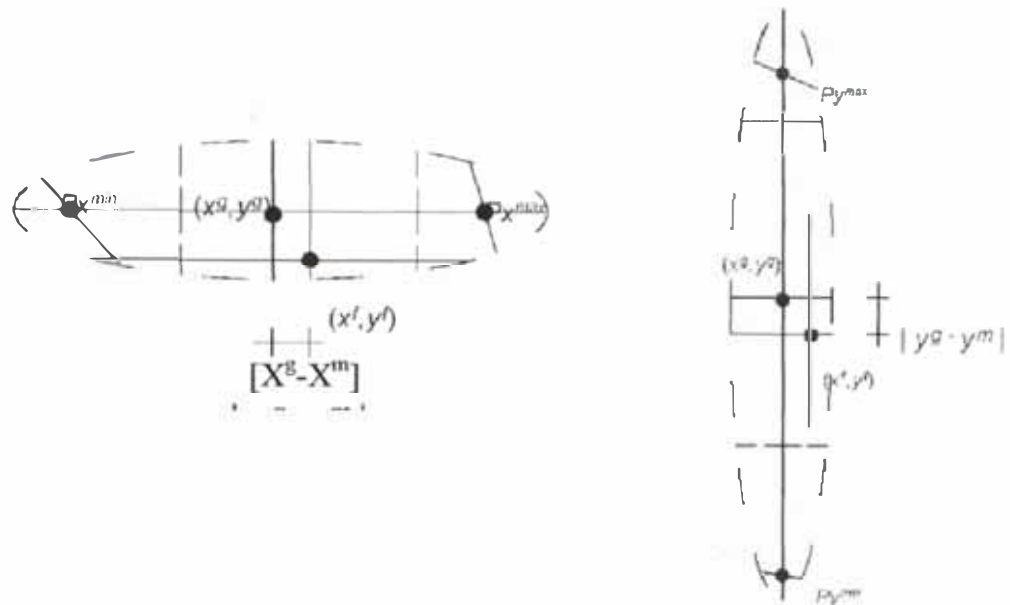


Figura 3.13. La ampliación de las zonas próximas al centroide permiten observar los valores considerados para el cálculo del parámetro. Las elipses indican la zona ampliada.

Sean  $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$ , los puntos de la forma geométrica (Figura 3.12) correspondientes a las coordenadas  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$ , que definen la planta de cada edificio. El centroide o centro de gravedad  $(x_g, y_g)$  se obtiene de las siguientes ecuaciones:

$$x_g = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \tag{ec. 3.20}$$

$$y_g = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \tag{ec. 3.21}$$

En donde  $A_i$ , son áreas parciales auxiliares de la figura que sirven para obtener el centro de gravedad y se obtienen de multiplicar  $x_i \cdot y_i$ . Se calcula además, un valor medio de los puntos más alejados de la figura en donde cruza una línea imaginaria que pasa por el centro de gravedad (Figura 3.13), mediante las ecuaciones 3.22 y 3.23 (Figura 3.13), en donde,  $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}$  y  $y_{\max}$ , corresponden a los valores de los puntos  $P_{x_{\min}}, P_{x_{\max}}, P_{y_{\min}}$  y  $P_{y_{\max}}$ , respectivamente.

$$x_m = \frac{(P_{x_{\min}} + P_{x_{\max}})}{2} \tag{ec.3.22}$$

$$y_m = \frac{(P_{y_{\min}} + P_{y_{\max}})}{2} \tag{ec.3.23}$$

Una vez calculados estos valores se sustituyen en las ecuaciones 3.24 y 3.25, con lo que se obtienen los valores de la regularidad en las direcciones  $x$  e  $y$  de la estructura. El valor máximo obtenido de la ecuación 3.26, permitirá obtener el parámetro 6.

$$IR_x = \frac{|x_g - x_m|}{\frac{1}{2}|x_{\max} - x_{\min}|} \quad \text{ec. 3.24}$$

$$IR_y = \frac{|y_g - y_m|}{\frac{1}{2}|y_{\max} - y_{\min}|} \quad \text{ec. 3.25}$$

$$IR = \max (IR_x, IR_y) \quad \text{ec. 3.26}$$

### Mampostería

- A.  $IR \leq 0.1$
- B.  $0.1 < IR \leq 0.5$
- C.  $0.5 < IR \leq 1.0$
- D.  $IR > 1.0$

### Concreto Armado

- A.  $IR \leq 0.25$
- B.  $0.25 < IR \leq 0.75$
- C.  $IR > 0.75$

### Parámetro 7: Configuración en elevación

La irregularidad en elevación de edificios de mampostería suele estar determinada por configuraciones como la presentada en la figura 3.14. Para evaluar dicho parámetro se consideran las dimensiones de  $H$  y  $T$ , cuya relación se utiliza para evaluar este parámetro. Se puede apreciar fácilmente, que el método califica favorablemente la existencia de variaciones excesivas en la masa de dos pisos consecutivos. Por lo tanto, la evaluación de este parámetro se realiza utilizando la variación de la altura en el edificio, es decir, los valores de la altura mínima (obtenido de  $H-T$ ) y máxima del edificio ( $H$ ). El valor del parámetro se obtiene de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 3.14, en donde  $RL$  es la relación entre las dos alturas ó altura promedio del edificio.

$$RL = \frac{H - T}{H} \quad \text{ec. 3.27}$$

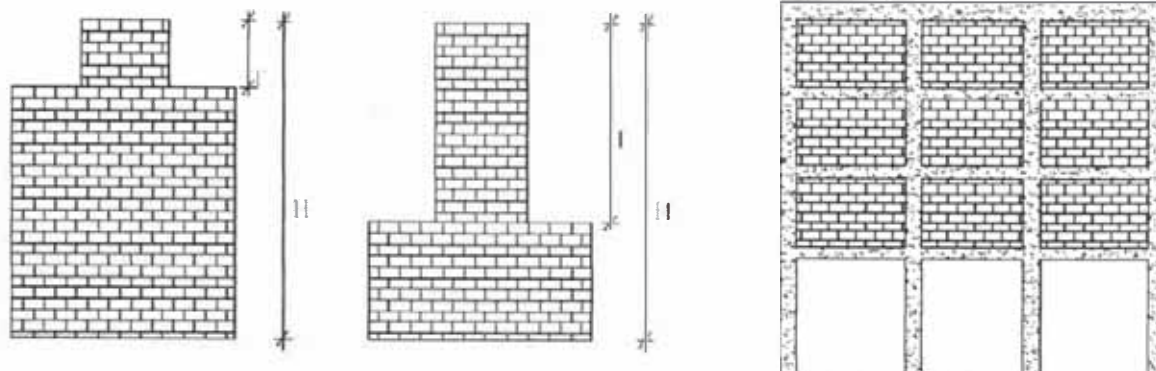


Figura 3.14. Formas originales consideradas para la evaluación del parámetro 7.

### Mampostería

- A.  $RL > 0.75$
- B.  $0.50 < RL \leq 0.75$
- C.  $0.25 < RL \leq 0.50$
- D.  $RL \leq 0.25$

### Concreto Armado

- A.  $RL > 0.66$
- B.  $0.33 < RL \leq 0.66$
- C.  $RL \leq 0.33$

### Parámetro 8: Distancia máxima entre los muros y conexiones entre elementos críticos

Para los edificios de mampostería, se tiene en cuenta el posible espaciamiento excesivo entre muros ubicados transversalmente a los muros maestros. La clasificación se define en función del factor  $L/S$ , donde  $S$  es el espesor del muro maestro y  $L$  es el espaciamiento máximo entre muros transversales. Este parámetro indica que al aumentar el espaciamiento máximo, producto de la eliminación de muros internos secundarios, se altera la vulnerabilidad sísmica del edificio. Este es un típico efecto de las ampliaciones y remodelaciones arquitectónicas que se realizan en las construcciones existentes, generalmente como consecuencia del cambio de uso de ciertos pisos en las edificaciones. Por otra parte, para el caso de los edificios de hormigón armado, a diferencia de los edificios de mampostería, analiza el tipo de conexión entre elementos críticos resaltando la importancia que tienen las uniones viga – columna ó losa – columna.

Sin embargo, en ambos casos no se cuenta con la información suficiente para calcular el parámetro, lo que obliga a evaluarlo de la siguiente manera: para el caso de los edificios de mampostería se recurre a datos estadísticos obtenidos, en donde, se

utiliza una relación entre el área construida en planta del edificio y el espaciamiento de los muros como lo muestran en las Figuras 3.15. Para este cálculo los datos estadísticos de las edificaciones de mampostería se clasificaron en dos: A) Para muros de mampostería de ladrillo de arcilla, concreto y otros, para los cuales se tomó con un espesor promedio de 0.25 metros. y B) Para muros de mampostería de adobe, piedra y otros, con espesores promedio de 0.8 metros. Con estas gráficas se calculan la relación  $L/S$ , que servirá para determinar el parámetro 8; utilizándose dos tipos de rango de evaluación para las clasificaciones propuestas.

Por otra parte para los edificios de hormigón armado, como se comentó califica la conexión entre elementos críticos, es decir, evalúa el tipo de unión entre los elementos resistentes vertical y horizontal mediante tres factores, cuyos valores dependen de detalles constructivos entre ambos elementos. Como esta información no se encuentra en la base de datos y en general es difícil obtenerla, se recurre al parámetro de asistencia técnica de un profesional a fin, asumiendo su buen comportamiento cuando existe la intervención de dicha persona; agregando a esta la utilización de la norma sismorresistente.

Para las construcciones de mamposterías se tendrán límites máximos y mínimos de valores de  $L/S$  tal como se puede observar en las gráficas.

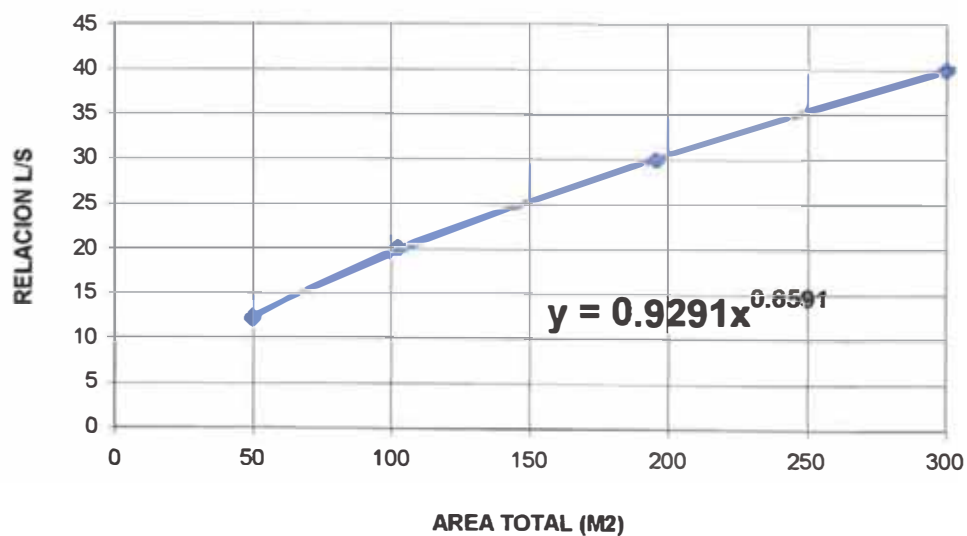


Figura 3.15 A. Relación del área total construida con el espaciamiento máximo de muros en los edificios de mampostería de ladrillo, concreto y otros.

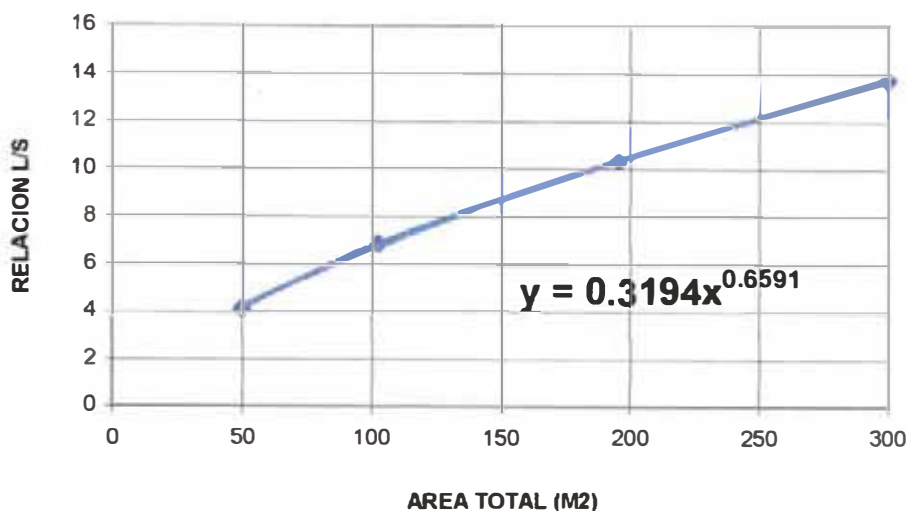


Figura 3.15 B. Relación del área total construida con el espaciamiento máximo de muros en los edificios de mampostería de adobe, piedra y otros.

### Mampostería

#### Mampostería de ladrillo de arcilla, concreto y otros

- A. Edificio con  $L/S < 15$ .
- B. Edificio con  $15 \leq L/S < 18$ .
- C. Edificio con  $18 \leq L/S < 25$ .
- D. Edificio con  $L/S \geq 25$ .

#### Mampostería de adobe, piedra y otros

- A. Edificio con  $L/S < 4.7$
- B. Edificio con  $4.7 \leq L/S < 5.6$
- C. Edificio con  $5.6 \leq L/S < 7.8$
- D. Edificio con  $L/S \geq 7.8$

### Concreto armado

- A. Año de construcción mayor a 1997 y con asistencia técnica.
- B. Año de construcción menor a 1997 y con asistencia técnica.
- C. sin asistencia técnica

### Parámetro 9: Tipo de cubierta

En el caso de los edificios de mampostería y concreto armado la influencia del tipo de cubierta en el comportamiento sísmico de un edificio es muy importante. Factores como su tipología y peso determinan dicho comportamiento.

Según las observaciones de campo se pudieron observar tres tipos de cubiertas zinc, eternit y tejar con barro; y combinaciones entre estas. Las dos características de la clase A de este parámetro está englobada por la asistencia técnica, ya que una construcción con dicha asistencia tendrá buenas conexiones y comportamiento



estructural eficiente. Por lo tanto para este parámetro solo se utilizó los campos de asistencia técnica y tipo de material de cubierta.

### Mampostería

- A. Cubierta estable debidamente amarrada a los muros con conexiones adecuadas, y de material liviano. Edificio con cubierta plana.
- B. Cubierta estable debidamente amarrada a los muros con conexiones adecuadas y de material no liviano; o cubierta inestable con material liviano y buenas condiciones.
- C. Cubierta inestable de material liviano en malas condiciones; o cubierta inestable con material no liviano y buenas condiciones.
- D. Cubierta inestable de material no liviano en malas condiciones.

### Concreto Armado

- A. Cubierta estable debidamente amarrada a los muros con conexiones adecuadas, y de material liviano. Edificio con cubierta plana.
- B. Cubierta inestable de material liviano; o cubierta estable de material no liviano
- C. Cubierta inestable de material no liviano.

### Parámetro 10. Elementos no estructurales

Se intenta tener en cuenta el efecto de los elementos que no forman parte del esquema estructural resistente, tales como cornisas, parapetos, balcones o cualquier elementos que sobresalga de la estructura y cuya caída pueda provocar víctimas.

Para un mejor análisis se decidió dar valores al punto número 11 de la ficha de evaluación, tal como sigue a continuación.

11.0 Elementos no estructurales		
	Bien ligados	Mal ligados
11.1 Corniza y Parepetos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11.2 Tanques de agua pre-fabricados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11.3 Balcones y volados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11.4 Pequeños elementos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Si los elementos están bien ligados se les asignará un valor a  $x = 1$ , si fuesen mal ligados  $x = 10$ , en caso de no existir el elemento de análisis no se marcará nada y su valor de la celda será de 0; Luego de darles valor a las celdas se sacará la sumatoria de todo el parámetro de análisis.

### Mampostería

- A. Edificio sin cornisas y sin parapetos.
- B. Edificio sin cornisas y sin parapetos. Edificio con cornisas bien conectadas a la pared, con tanques de agua de pequeña dimensión y de peso modesto. Edificio cuyo balcón forma parte integrante de la estructura de los diafragmas. Edificio con elementos de pequeña dimensión bien vinculados a la pared.

- C. Edificio con elementos de pequeña dimensión, mal vinculados a la pared.
- D. Edificio que presenta tanques de agua o cualquier otro tipo de elemento en el techo, mal vinculado a la estructura. Parapetos u otros elementos de peso significativo, mal contruidos, que pueden caer en caso de terremoto. Edificio con balcones contruidos posteriormente a la estructura principal y conectados a ésta de modo deficiente.

### **Concreto armado**

- A. Que cumpla con la clase A o B de mampostería.
- B. Edificio con elementos de pequeña dimensión, mal vinculados a la pared.
- C. Edificio que presenta tanques de agua o cualquier otro tipo de elemento en el techo, mal vinculado a la estructura. Parapetos u otros elementos de peso significativo, mal contruidos, que pueden caer en caso de terremoto. Edificio con balcones contruidos posteriormente a la estructura principal y conectados a ésta de modo deficiente.

### **Parámetro 11. Estado de conservación**

Por último, este parámetro, enteramente subjetivo califica de una manera visual la presencia de desperfectos internos de la estructura, así como posibles irregularidades como productos de fallos en el proceso constructivo. Es obvio que la edad de la construcción en este caso juega un papel importante, debido a que el estado de conservación dependerá de la antigüedad de los edificios, ya que el material de construcción se deteriora con los años lo que lleva a la pérdida de la capacidad de resistencia; el año para la evaluación de este parámetro es de 1981, año que se escogió debido a que en 1980 a 1981 la ciudad de Ayacucho fue afectada por una continua y persistente serie de sismos, asumiendo que construcciones que hayan pasado estos eventos sísmicos sufrieron daños en su resistencia y configuración estructural. Por lo tanto en el parámetro se evaluará utilizando la edad de construcción y las evaluaciones visuales del estado de la construcción por personas conocedoras del tema.

### **Mampostería**

- A. Muros en buena condición, sin lesiones visibles, año de construcción mayor a 1981.
- B. Muros en buena condición, sin lesiones visibles, año de construcción menor a 1981; ó muros que presentan pequeñas fisuras y año de construcción mayor a 1981.
- C. Edificios que no presenta lesiones pero con estado mediocre de conservación, o muros con lesiones de tamaño medio, con año de construcción mayor a 1981. Muros que presentan pequeñas fisuras o edificios que no presentan lesiones pero en un estado mediocre de conservación y año de construcción mayor a 1981.
- D. Muros con fuerte deterioro en sus componentes.

### **Concreto Armado**

- A. Bueno.
- B. Ligeramente dañado
- C. Mal estado de conservación

### 3.9 Resumen

En este capítulo se hizo una revisión de algunas metodologías existentes para la evaluación sísmica de las estructuras, viendo sus ventajas y limitaciones de cada una de ellas. También se hace una completa descripción de la metodología del índice de vulnerabilidad, ya que es la que se implementará en este trabajo.

Se describe el porque de la elección de la metodología, viendo las ventajas de ella sobre las demás estudiadas y su aplicación sobre el lugar de estudio. Esta metodología con el pasar de los años fue mejorando y siendo calibrada para distintos lugares, por lo que para nuestro estudio fue adaptada bajo ciertos puntos; tomando como base nuestro Reglamento Nacional de Construcciones.

También se describe cada uno de los parámetros que influirán para la evaluación de edificaciones de mampostería y concreto armado, tomando ciertos criterios que fueron fáciles de obtener y que representen los distintos parámetros.

**CAPITULO IV**  
**Sistema de información**  
**geográfica (SIG)**

## **4. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA**

### **4.1 Introducción.**

Hace casi 30 años, un gran número de geógrafos crearon un sistema de almacenamiento y organización de información espacial en un ordenador, sin llegar a darle un nombre propio (ESRI, 1995). Fue en el inicio de la década pasada, cuando este proyecto llegó a ser conocido como sistema de información geográfica (SIG). Con estos sistemas paralelamente se fueron desarrollando aplicaciones importantes como la cartografía de alta resolución, la planificación del uso de suelo, gestión de recursos naturales, evaluación y planificación ambiental, investigación ecológica, comunicaciones, investigación demográfica, servicios, aplicación a negocios, entre otras muchas.

El interés del SIG continuó creciendo gracias a que son un medio de integración de la información de manera que ayudan a entender y ordenar algunos de los problemas con mayor riesgo a los que se enfrenta el mundo actual, como la deforestación tropical, la lluvia ácida, la urbanización rápida, el crecimiento incontrolable de la población, la hambruna, el esparcimiento de enfermedades e impactos de cambios en nuestro clima y, actualmente, el riesgo sísmico (aunque no es un problema nuevo, su implementación en los SIG, resulta ser relativamente reciente). Un SIG ayuda a organizar los datos con respecto a estos problemas y a entender su relación espacial, creando una base de datos para hacer más sensibles e inteligentes la toma de decisiones. Además, la reducción de los costos en los equipos informáticos ha permitido también que el SIG incremente rápidamente su uso.

Dentro de las ventajas que presentan el SIG en las aplicaciones está la discretización de la información en sistemas de pequeñas unidades que pueden almacenarse en una base de datos divididas en dos temas principales: por una parte la información referente a la ubicación o localización georreferenciada de los elementos de estudio, y por la otra, la información descriptiva de los mismos. Es decir, por una parte en forma geométrica se representan los elementos, que se pueden describir por medio de diferentes temas, por ejemplo, un elemento geométrico georreferencial que represente una ciudad puede estar acompañado de información en forma tabular como

el uso de suelo, tamaño de la población, geología, topografía, etc., relacionados por un indicador común.

La capacidad del SIG para obtener y representar los resultados de los análisis en mapas temáticos resulta fundamental en cualquier estudio geográfico, en especial en los estudios de riesgo sísmico. Estos mapas permiten mostrar los posibles escenarios de daño de la zona en estudio, con la cual se pueden estimar localizaciones y regiones con riesgo sísmico más alto, sitio con efectos locales del suelo más marcados, estructuras más vulnerables, estimaciones de pérdidas esperadas, dando una idea global del problema y sentando las bases para dar soluciones al mismo, mediante planes de mitigación del riesgo sísmico.

## 4.2 Definición de los sistemas de información geográfica (SIG)

Dentro de un contexto de innovación, el SIG ha tenido un papel importante como una tecnología avanzada de integración. A pesar de ser relativamente nuevos, el SIG ha evolucionado gracias a la unión de un número discreto de pequeñas tecnologías en un todo. El SIG ha surgido como una tecnología muy poderosa ya que permite a los geógrafos integrar sus datos y métodos tradicionales de análisis geográfico, como el análisis de superposición de mapas, con nuevos tipos de análisis y modelación, que están más allá de los métodos manuales. Con el SIG es posible realizar mapas, modelos, consultas y análisis de grandes cantidades de información todos ellos apoyados en una base de datos.

En el desarrollo del SIG se ha confiado en las innovaciones realizadas por muchas disciplinas como son: la Geografía, Cartografía, Fotogrametría, Topografía, Geodesia, Ciencias de la Computación, Investigación de Operaciones, Inteligencia Artificial, Demografía, Sismología y muchas otras ramas de la Ciencias Sociales, Ciencias Naturales e Ingeniería. Por todo esto, por la variedad de aplicaciones y por la variedad de sistemas desarrollados, existen en la actualidad dificultades para dar una definición única de los SIG. Por lo tanto, tratando de integrar todos los aspectos que cubren los SIG, se utilizará la siguiente definición (ESRI, 1995; GIS Development; NOAA):

*“El SIG es un sistema organizado de equipo informático, software, datos geográficos y descriptivos, así como diseños personales para hacer más eficiente la captura, almacenamiento, actualización, manipulación, análisis y despliegue de todas las formas de información georreferenciada”*

La palabra SIG es un acrónimo de tres palabras básicas: **Sistemas, información y Geográfica**, cuyo significado permite un fácil entendimiento.

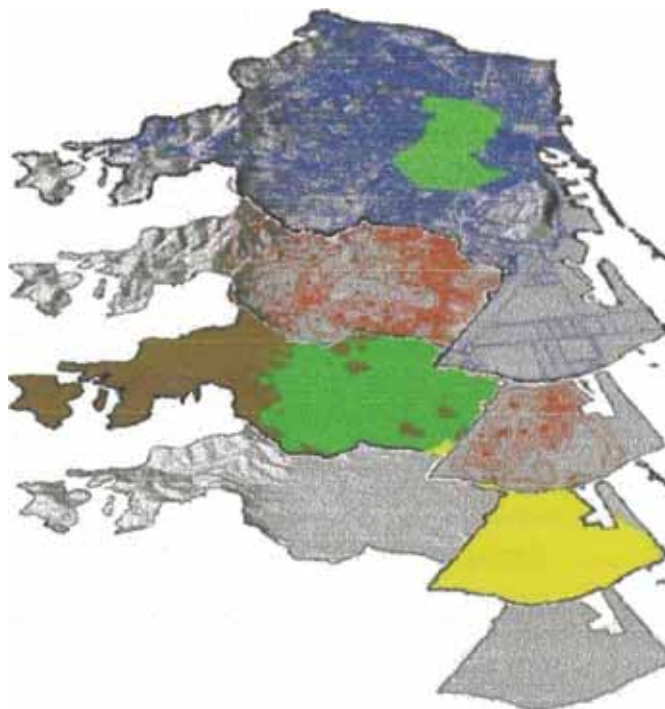
- **Sistemas.** Este término se utiliza para representar los subsistemas que integran el SIG. Es decir, un ambiente de trabajo complejo que se divide en diferentes componentes para una mayor facilidad de entendimiento y de manejo, pero considerándolas como parte integral de un todo. El avance en la informática ha ayudado e incluso necesitado de esta división para que la mayoría de los SIG se pudiera automatizar.
- **Información.** Esta palabra representa la gran cantidad de datos que normalmente se requieren y manipulan en un SIG. Es decir, todos los objetos



del “mundo real” tienen su propio grupo de características o atributos descriptivos en forma alfanumérica no espacial, formando la parte fundamental de la información de cada elemento geográfico que se encuentre en estudio.

- **Geográfica.** Este término es la base de los SIG, ya que tratan primero cada elemento del “mundo real” de una forma geográfica o espacial. Es decir, estos elementos están referenciados o relacionados con una posición específica en el espacio. Sin embargo, estos elementos no sólo pueden ser físicos sino que también pueden ser culturales o económicos. Por ejemplo, los elementos en un mapa son una representación gráfica de los objetos espaciales del “mundo real”, así como los símbolos, colores y estilos de líneas que se utilizan para representar los diferentes elementos espaciales de un mapa en dos dimensiones.

Con todo esto se puede observar que tanto la geografía, como los datos descriptivos son la parte fundamental de nuestro mundo, es decir, cualquier decisión que se tome esta restringida, influenciada o indicada por algún hecho geográfico, dependiente de un concepto descriptivo. El SIG permite representar las características de los elementos de estudio en diferentes capas y temas, como pueden ser la hidrografía, la topografía, el uso de tierra, el tipo de suelo, la demografía, la división política, etc. Como ejemplo se puede ver en la Figura 4.1.



**Figura 4.1** Ejemplo de representación de información correspondiente a un área geográfica con diferentes temas y capas (Mena et al, 2001). En esta figura se muestra de abajo a arriba los datos correspondientes a la topografía, tipo de suelo, datos de microzonificación e información catastral de la ciudad de Barcelona.

### 4.3 Componentes de SIG

Como se ha comentado, un SIG es un sistema que integra un grupo de subsistemas esenciales para un correcto funcionamiento, entre estos se tienen: un

equipo informático, el software correspondiente al sistema, información georreferenciada de los elementos de estudio, así como sus atributos descriptivos y un diseño específico de la aplicación. La Figura 4.2 esquematiza los principales componentes de un SIG y la forma de interactuar entre ellos. (ESRI, 1995; GIS Development), cuya descripción se muestra a continuación.



Figura 4.2. Principales componentes de un Sistema de Información Geográfica.



*Información Georreferenciada.* Con el equipo informático y software seleccionado, se introducen los elementos que forman el “mundo real”, ubicándolos georreferencialmente. Esto se logra gracias a la interrelación de diferentes campos como son: el catastro, la topografía, el levantamiento, la fotogrametría, el procesamiento de imágenes, la percepción remota, la planeación rural y urbana, la ciencia de la tierra y la geografía.



*Atributos descriptivos.* Estos corresponden a la información que cada elemento tiene, representados por puntos, líneas o polígonos, en su forma más simple. Estos se almacenan en una tabla que se encuentra relacionada con los elementos por medio de un indicador común.



*Equipo informático.* Esto corresponde a la parte física del sistema y forma la parte medular de un SIG. Puede estar constituido por un ordenador, en donde se realizan todas las operaciones geográficas; digitalizador y escáner, para convertir una imagen en formato digital; equipos GPS, etc.



*Software.* Esencial para introducirse en el ambiente de trabajo de un SIG. Provee de las funciones y herramientas necesarias para el almacenamiento, análisis y despliegue de la información. La variedad es

amplia y entre ellos se encuentran: IDRISI, Mapinfo, ArcView, GRASS, ILWIS, ERDAS, ARCINFO, entre otros.



Obviamente, un SIG no podría existir sin el trabajo de las personas dedicadas a la planeación de proyectos. Forman parte esencial en la elaboración del diseño que se requiere para el proyecto y pertenecen a un grupo multidisciplinarios, integrado por geólogos, ingenieros, administradores, ecónomos, geógrafos, y muchos más.

Como se mencionó antes, el usuario llega a ser parte esencial del SIG cuando los análisis requieren la habilidad en la selección y uso de herramientas auxiliares y conocimiento del tema de los datos que se usarán. En ocasiones la utilización de algunos programas externos, ayudan a mejorar el funcionamiento o lo hacen más eficiente; esto dependerá de las necesidades que se tengan y de la disponibilidad de estos programas.

Finalmente, un SIG no es sólo un equipo informático que se utiliza para elaborar mapas, aunque puede crear mapas a diferentes escalas, en diferentes proyecciones y con diferentes colores. Un SIG es una herramienta analítica con la que se pueden realizar operaciones espaciales o geográficas, basadas en conceptos matemáticos que, en ocasiones, pueden llegar a ser complejas, además de identificar los elementos de los mapas mediante relaciones espaciales.

#### 4.4 Datos geográficos

Aunque los términos dato e información normalmente se utilizan en forma arbitraria, cada uno de ellos tiene un significado específico, esto es, los datos describen las diferentes observaciones realizadas de un proyecto que se recogen y almacenan en un sistema, mientras que la información la constituyen los datos almacenados analizados y procesados para responder preguntas y resolver problemas. Existen dos tipos de datos geográficos básicos: los datos no espaciales (atributos) y los datos espaciales o geométricos (Figura 4.3).

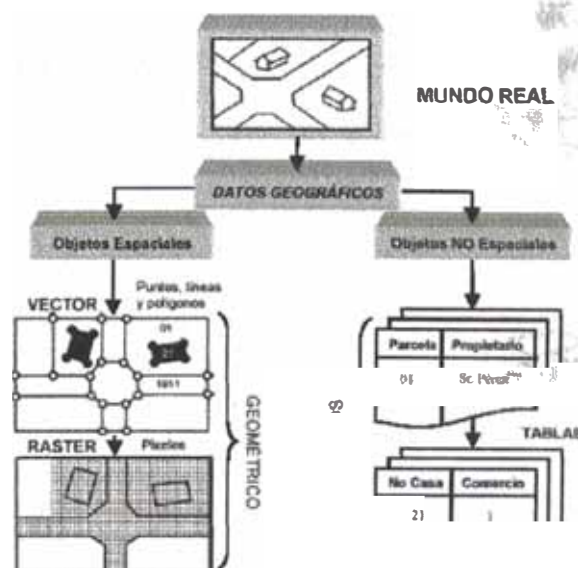


Figura 4.3. Componentes básicos de los datos geográficos (ESRI, 1995).

Los datos geográficos están organizados en bases de datos, normalmente considerados como la unión de datos referenciados espacialmente junto a una descripción específica que actúa como un modelo de la realidad. Estas bases de datos están compuestas por dos componentes esenciales que son: la posición geométrica y sus atributos o propiedades (Figura 4.3), que permiten responder preguntas básicas del análisis georreferencial (Figura 4.4), como pueden ser. ¿Dónde está? Ó ¿Qué es?.



Figura 4.4. Estructural del análisis georreferencial.

#### 4.4.1 Atributos

Los atributos son los datos descriptivos numéricos o alfanuméricos de los elementos geográficos que representan el mundo real. Generalmente, se conocen como datos no espaciales y se encuentran almacenados en tablas de atributos. Estas tablas se dividen en dos:

- Tablas de atributos básicos: normalmente, almacenan la información básica de los elementos o información interna del SIG. En estas tablas, cada elemento va acompañado de un registro en la tabla de atributos básicos. Esta tabla no se puede modificar, ya que en un registro interno del mismo SIG con formato propio y único para cada elemento.
- Tablas de atributos de relación: estas pueden ser tablas del SIG o tablas externas que se relacionan con las tablas de atributos básicos mediante un campo común (Figura 4.5). En esta tabla el formato de los campos es libre, lo que permite al usuario definirlo, de acuerdo a la información que se almacene en él. En general, las tablas se generan en el mismo SIG, sin embargo, se pueden agregar tablas externas procedentes de otras bases de datos, como ORACLE, ACCESS, etc. Una ventaja de unir tablas externas a la base de datos es reducir la redundancia y por lo tanto la cantidad de datos.

Ambas tablas de atributos pueden almacenar varios campos de datos, normalmente referidos a las columnas de las tablas, mientras que las líneas corresponden a los registros de los elementos del mundo real representados. Además, estas tablas se almacenan en un directorio llamado INFO, localizado normalmente en el espacio o área de trabajo del proyecto, cuya estructura se muestra en la figura 4.6.

EL subdirectorío INFO contiene una serie de archivos generados por el SIG, donde se almacenan los datos del proyecto. Estos archivos se crean automáticamente con diferentes extensiones, que sólo se actualizan o modifican por el SIG. De la



misma manera, se crea un subdirectororio para cada cobertura del proyecto en donde se generan una serie de archivos dependiendo del tipo de información que se está utilizando (puntos, líneas, polígonos, etc.), como se observará más adelante.

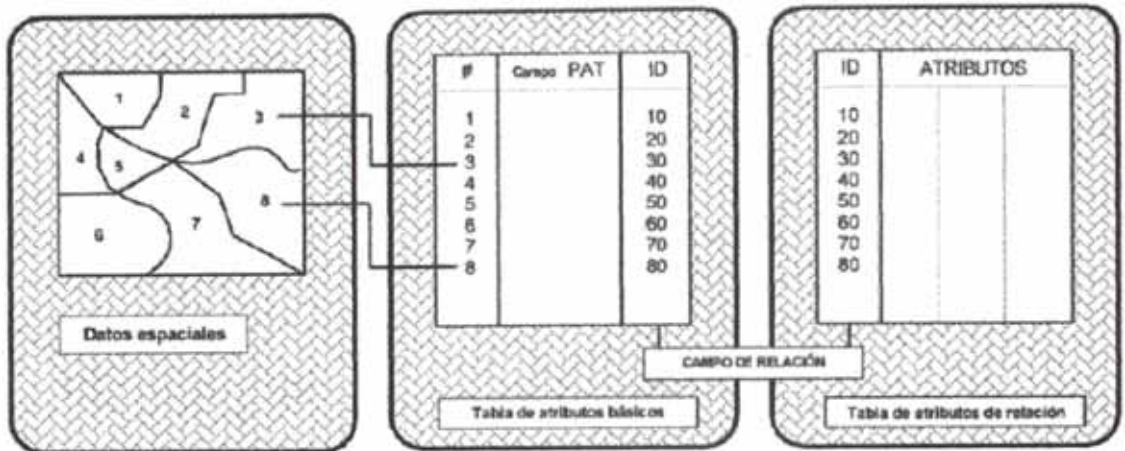


Figura 4.5. Tablas de atributos básicos y de relación.

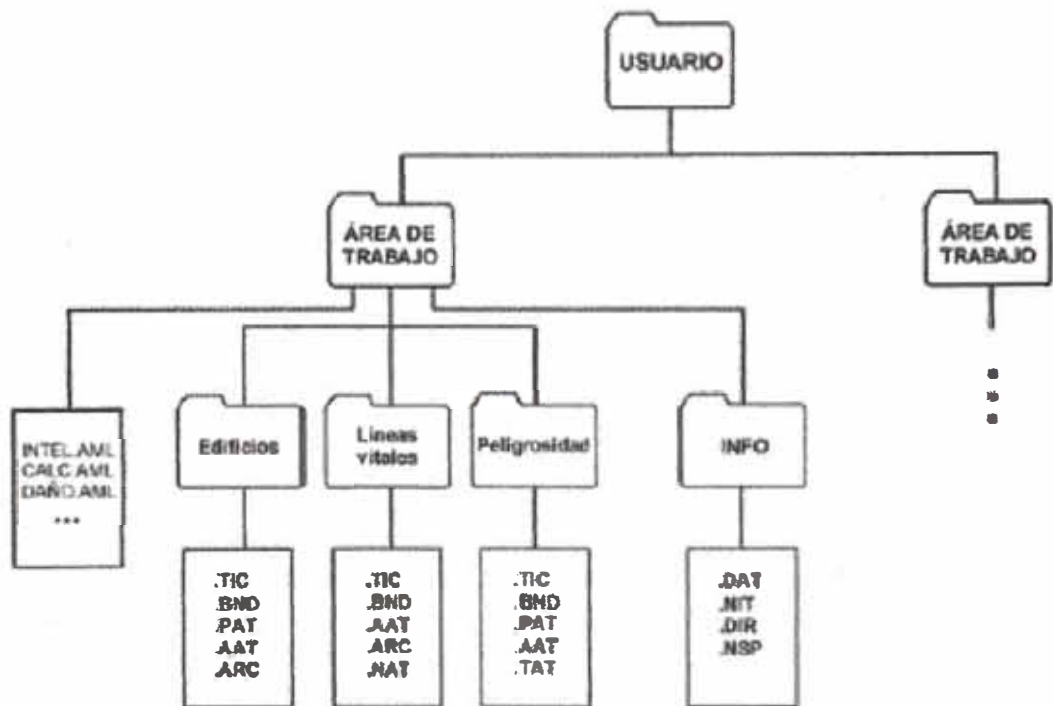


Figura 4.6. Estructura normal de un proyecto de SIG.

TIPO DE ELEMENTO	TIPO DE TABLA DEL ELEMENTO	EXTENSIÓN
Punto	Tabla de atributos de punto	.PAT
Arco	Tabla de atributos de arco	.AAR
Polígono	Tabla de atributos de polígono	.PAT
Nodo	Tabla de atributos de nodo	.NAT
Subclase anotación	Tabla de atributos de anotación	.TATsubclass
Subclase ruta	Tabla de atributos de ruta	.RATsubclass
Subclase sección	Tabla de atributos de sección	.SECsubclass
Subclase región	Tabla de atributos de polígono	.PATsubclass

Tabla 4.1. Tablas de atributos y extensiones comunes utilizadas para los elementos.

Como se mencionó antes, las tablas de atributos constan de varios campos de datos en forma de columnas, en donde se almacenan la información de los elementos del mundo real en registros correspondiendo a las líneas de las tablas. A cada columna se le asigna un nombre, un formato (dependiendo del tipo de información numérica o alfanumérica), un tamaño y una extensión. Esta extensión dependerá del tipo de elementos que se están manejando, como ejemplo, en el caso que sean puntos se utiliza la extensión. PAT o cuando son líneas se usan la extensión. AAT. En la Tabla 4.1, se resumen algunos de los elementos más usados en los SIG y la extensión que normalmente se le asigna automáticamente.

#### 4.4.2 Elementos geométricos

Los datos geométricos o datos espaciales permiten modelar los elementos del mundo real cuya posición es única en un sistema de coordenadas específico, por ejemplo, para áreas pequeñas el sistema de coordenadas que se utiliza es el UTM (Universal Transversal Mercator) mientras que para áreas grandes, se puede usar cualquier otro. Las formas más usadas para modelar los elementos del mundo real son los puntos, líneas y polígonos en su representación más básica (Figura 4.7), y superficies continuas, parrillas, etc., para modelos más complejos.

**Puntos.** Los puntos son las formas más simples de representar los datos espaciales. Son objetos adimensionales y se ubican en el espacio únicamente por un par de coordenadas. Representan elementos cuyas dimensiones se pueden despreciar (como postes, pozos, etc.) y sirven como etiquetas para identificar polígonos.

**Líneas.** Las áreas llamadas también segmentos o arcos, son objetos espaciales unidimensionales compuestos de un grupo de coordenadas ordenadas y conectadas entre sí para formar las líneas. Representan elementos muy angostos como son ríos, carreteras, etc.

**Áreas.** Las áreas también llamadas polígonos son líneas cerradas, cuyas fronteras encierran un área homogénea, estas pueden representar lagos, estados, países, etc., en dimensiones grandes y edificios, puentes, presas, en dimensiones pequeñas.

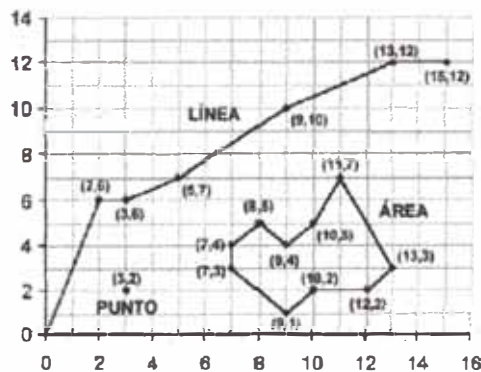


Figura 4.7. Elementos geográficos básicos para la modelación del mundo real.

Cada punto se registra como una posición única  $x$ ,  $y$ , mientras que las líneas o arcos se registran como una serie ordenada de coordenadas  $x$ ,  $y$ . Las áreas son arcos cuyos puntos inicial y final se unen formando una superficie llamada también



polígono. Conceptualmente, estas coordenadas se almacenan en un ordenador en forma digital, asignándoseles un número o identificador que servirá para relacionarlo con el elemento que está representando. Sin embargo, para interpretarlo realmente como elementos espaciales relacionados con información adicional o tabular, se necesita construir una tipología del sistema para identificar las líneas de conectividad a lo largo de una ruta, para definir las áreas encerradas entre líneas y para identificar las áreas contiguas.

En los mapas digitales, las relaciones espaciales explícitamente se dibujan utilizando un proceso matemático llamado *topología*, que permite expresar los diferentes tipos de relaciones espaciales como una lista de elementos (por ejemplo, un área está definida por un conjunto de elementos arco). Este proceso crea y almacena la relación espacial de los elementos, con la ventaja de hacer más eficiente el almacenamiento, permitir procesos de una gran cantidad de datos y de una forma más rápida, y sobre todo realizar análisis como la modelación del flujo a través de las líneas de conectividad en una red, la combinación adyacente de polígonos que tienen características similares y la superposición de elementos geográficos. Estos procesos topológicos se dividen en tres grupos principales:

- a) *Conectividad*. Este proceso identifica la conexión de las líneas o arcos, por medio de nodos (Figura 4.16). La serie de puntos (x, y) internos que definen la forma de un arco se llaman vértices, mientras que los puntos extremos se llaman nodos e identifican el nodo de inicio y el nodo final.

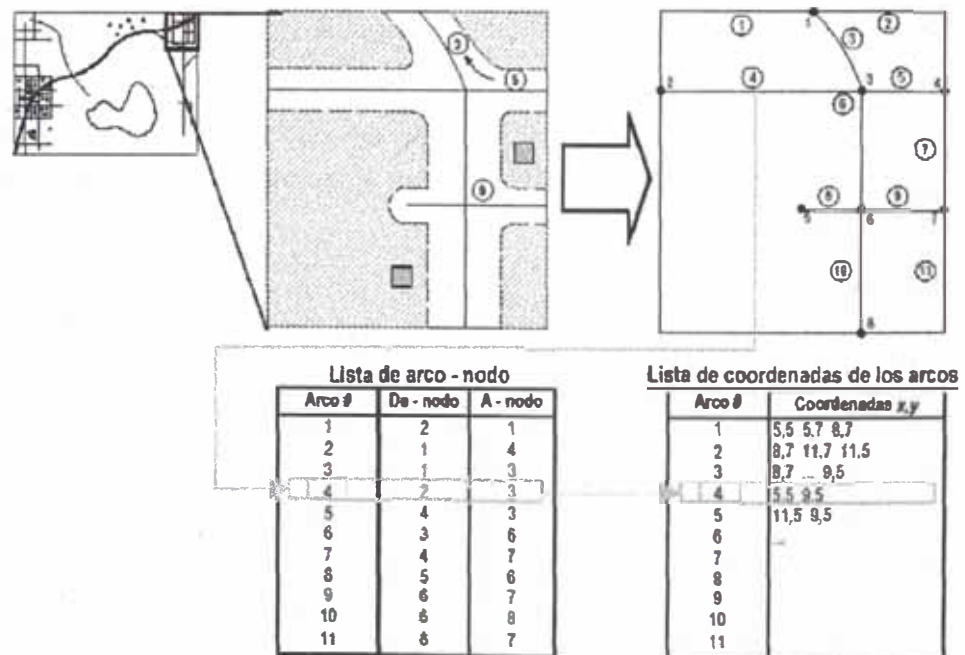


Figura 4.8 Proceso topológico ARCO-NODO o conectividad.

- b) *Definición de área*. Este proceso identifica la lista de arcos que forman un polígono (Figura 4.9). La ventaja de la topología de la definición de área es que aunque los arcos aparecen en más de un polígono, éstos solo se almacenan una vez en el sistema. Por ejemplo, el polígono 2, está definido por los arcos 4, 6, 7, 10 y 8, en donde el 0 indica que existe un polígono interior definido por el arco 8.

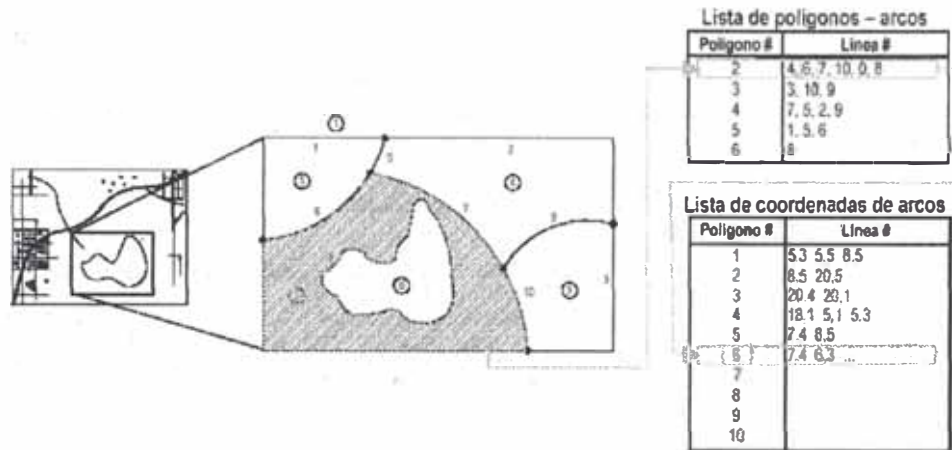


Figura 4.9. Proceso topológico, POLÍGONO – ARCO o definición de áreas.

- c) *Contigüidad.* Debido a que cada arco tiene dirección (de nodo, a nodo) y en general forman parte de varios polígonos, la topología de contigüidad permite identificar la dirección de los arcos y los polígonos que los contienen. En el caso de los polígonos exteriores siempre coincidirán con el polígono universal que representa el área total del estudio. Por ejemplo, esta figura se observa que el polígono 2 está a la izquierda del arco 6, y el polígono 5 está a la derecha.

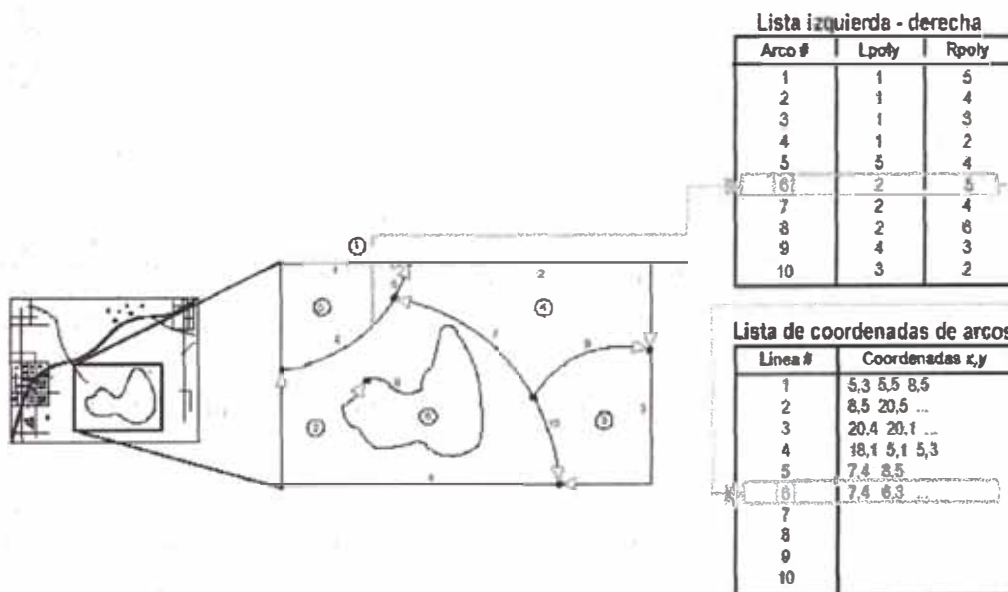


Figura 4.10: Proceso topológico izquierda – derecha o contigüidad.

#### 4.4.2.1 Coberturas

Los elementos de los mapas modelados del mundo real se pueden organizar en diferentes grupos de capas o temas de información, como pueden ser carreteras, suelos, puentes, pozos, peligrosidad sísmica, edificios, fronteras administrativas, etc., y a su vez se pueden dividir en sectores más pequeños para hacer más eficiente y rápido el manejo de la información. A estas capas o temas se les llama *coberturas* y están formadas por elementos geográficos unidos topológicamente y asociados a

información descriptiva almacenada en tablas, así como elementos que, aunque no se utilizan para modelar, sí son indispensables para la elaboración y manejo de las coberturas, como pueden ser Anotaciones, Regiones, Tics, Secciones, etc., y que se resumen en la Tabla 4.2.

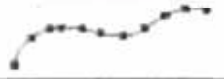


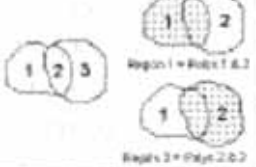
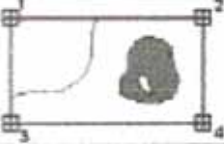



Clase de elemento	Descripción	Tabla de atributos	Ejemplo
Arco	Línea definida por un grupo ordenado de coordenadas x,y. Representa elementos líneas, y las fronteras de los polígonos.	AAT	
Nodo	Puntos extremos de un arco o puntos donde se conectan dos o más arcos.	NAT	
Etiqueta	Punto definido por una coordenada x,y - elemento punto o etiqueta de un polígono.	PAT	17 +
Polígono	Área definida por arcos.	PAT	
Región	Área formada por polígonos.	PAT.subclass	
Tic	Puntos de control geográfico utilizados para registrar y transformar las coordenadas de una cobertura.	TIC	
Anotación	Cadena de texto que sirve para describir un elemento geográfico. Se utilizan puntos para ubicarla y dibujarla.	TAT.subclass	
Ruta	Elemento lineal compuesta de uno o más arcos o partes de arcos.	RAT.subclass	
Sección	Arco o porción de arco que se utiliza para definir una ruta.	SEC.subclass	

Tabla 4.2. Resumen de los elementos utilizados en una cobertura.

#### 4.4.2.2 Elementos avanzados

Además de las formas básicas para modelar los elementos del mundo real, existen otras más sofisticadas, como la modelación de superficies. Las superficies constituyen una cobertura temática muy importante en las bases de datos geográficos. Estas superficies se pueden utilizar para muchas aplicaciones como son: estudios de visibilidad, cálculos volumétricos, contornos, trazos de relieves, sombreados, vistas en perspectiva de modelos 3D, etc.

Debido a que las superficies reales varían continuamente, es posible registrar todas las posiciones que las definen, por lo tanto, los modelos de superficies, toman muestras representativas del número infinito que define las superficies, para que posteriormente utilizando técnicas matemáticas llamadas interpolación, construyan los vacíos entre los puntos. La exactitud de este proceso depende de la cantidad de datos y de su distribución, además de la técnica de interpolación.

Aunque la superficie de la Tierra es la que se modela más a menudo, cualquier dato continuo como por ejemplo el gradiente de presión, la lluvia, la densidad de población, etc., también se puede modelar. En los análisis en 3 dimensiones se utilizan dos tipos de modelos para representar las superficies, estos son:

- **GRID.** Los GRID representan superficies utilizando una malla de puntos espaciados regularmente. El tamaño de las células se calculará por el promedio de los valores de puntos más cercanos, esto dará un mayor peso e influencia a los más cercanos. La resolución además dependerá de la distancia entre los puntos, es decir, cuanto más pequeña sea la distancia más fina será la malla obtenida, modelando con esto superficies más exactas.

El modelado de las superficies con GRID es generalmente sencilla, además de que los procesos posteriores con estas superficies son más eficientes que con otros modelos. Sin embargo, como contra parte, debido a que la estructura de la malla es rígida, no se adapta completamente a la variedad del terreno (pérdida de información entre puntos de la malla), por lo que los datos originales pueden ser capturados y reflejados incorrectamente.

- **TIN (Triangulated Irregular Networks).** Los TIN representan superficies utilizando caras triangulares no superpuestas continuas. En este caso el tamaño de las células dependerá de la cantidad de datos que se tengan y de su distribución. Por lo que la resolución de la superficie puede variar, es decir, la resolución será más fina en las áreas complejas o donde existan más datos, mientras que en las áreas pobres de información será menor la resolución. Una característica más de los TIN, es que las coordenadas originales de los puntos se mantienen, evitando con ella la pérdida de información. De la misma manera que los GRID, los TIN tienen algunos inconvenientes, entre estos principalmente se encuentra el costo en la construcción de las superficies, así como el resto de los procesos que se realicen con ella.

En este trabajo, se utilizará los modelos TIN, para construir la cobertura de la topografía, debido a la irregularidad de la información. Posteriormente, esta cobertura TIN se transformará en coberturas GRID, para hacer más eficiente los análisis y visualizaciones que se requieran.

Un paso esencial antes de la construcción de las coberturas de la topografía como TIN, es construir una cobertura de puntos con los datos de la altimetría, así como coberturas de polígonos que permitan delimitar la información, que para este trabajo será la ciudad de Ayacucho. (Figura 4.11)

Este tipo de modelos permiten generar eficientemente superficies para su análisis y visualización, utilizando las capacidades con que cuentan los TIN, algunas de ellas son:

- Interpolación de valores de superficies z.
- Generación de contornos
- Cálculo de pendientes, aspectos, área de la superficie, longitud de la superficie.



- Generación de polígonos aproximados de Thiessen.
- Análisis volumétrico y de relleno.
- Extracción de elementos de la superficie.
- Generación de perfiles de una o más superficies.
- Análisis sofisticados de la visibilidad.
- Sombreado analítico.



Figura 4.11. Generación de un modelo TIN a partir de una cobertura de puntos.

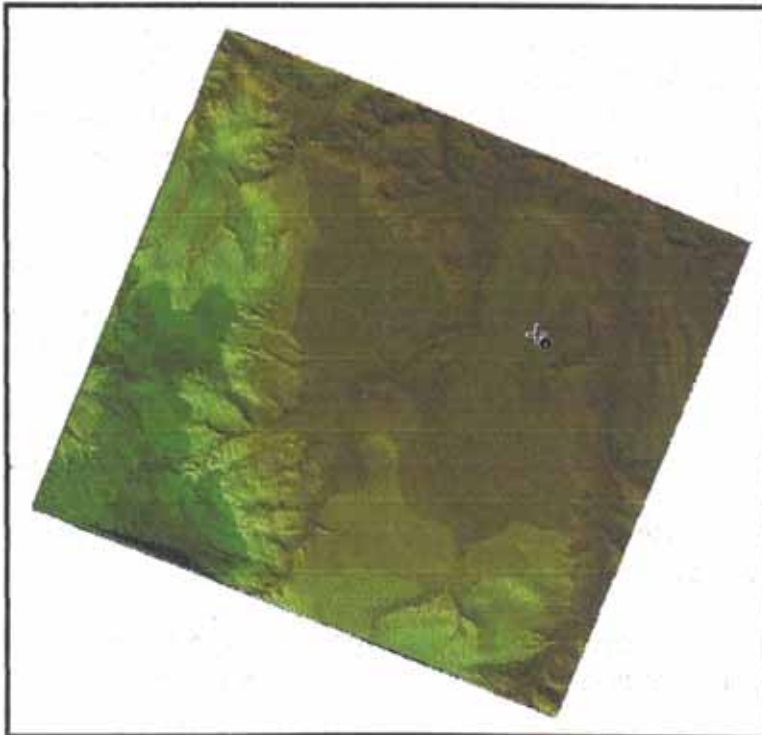
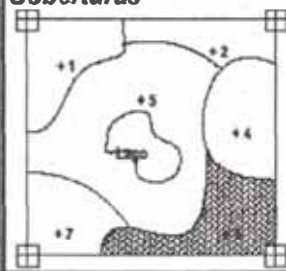
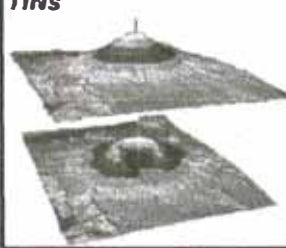



Figura 4.12. Sombreado analítico de una superficie a partir de un modelo TIN.

Sin duda una de las principales características de los TIN son la capacidad para la proyección de los elementos de estudio (Figura 4.11), es decir, puede dibujar los triángulos generados junto con los nudos, orillas, en su forma más básica, así como los contornos de una superficie, curvas de nivel, vistas desde diferentes puntos de observación, los valores de la interpolación de la superficie, vista de sombreado basado en una posición del sol, dibujos compuestos de superficies ganando elevación e iluminación de sol, etc.

Además de los elementos básicos (puntos, líneas y polígonos) y los TIN, existen otros elementos que se utilizan para la modelación del mundo real como se muestra en forma resumida en la Tabla 4.4, junto con su estructura, el objeto espacial que puede representar, los atributos que tiene y por último el uso que se le puede dar.

Otra forma de modelar elementos del mundo real con ARC/INFO, a partir de imágenes o mapas de bits usando utilidades avanzadas como son los comandos REGISTER y RECTIFY. Estas utilidades permiten transformar las coordenadas de imágenes obtenidas en un proceso de escaneado a unidades reales de mapas (por ejemplo, UTM), con lo cual se incorpora a la base de datos detalles de los elementos modelados. No obstante, estos estudios se realizarán en trabajos futuros, ya que no forman parte de los objetivos de este trabajo.

DATOS GEOGRÁFICOS	ESTRUCTURA	OBJETOS ESPACIALES	TABLA DE ATRIBUTOS	USO
<b>Coberturas</b> 	Vector topológico Georeferencial arc-nodo	Etiquetas Arcos Nodos Polígonos Anotaciones Rutas Secciones Tics	PAT AAT NAT PAT TAT RAT SEC TICS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bases de datos cartográficos</li> <li>- Automatización y actualización de datos espaciales</li> <li>- Modelación de datos espaciales</li> <li>- Mapas bases para la cartografía</li> </ul>
<b>TINs</b> 	Superficie. Red irregular triangulada	Triángulos con aristas xyz	Ninguna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Representación de superficies (especialmente terrenos)</li> <li>- Modelación y visualización de superficies (contorno, visibilidad, 3-D, perfiles)</li> </ul>
<b>Parrillas o mallas</b> 	Raster georeferencial.	Células	VAT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis y modelación espacial</li> <li>- Representación de superficies</li> <li>- Exploración para la automatización de datos</li> </ul>



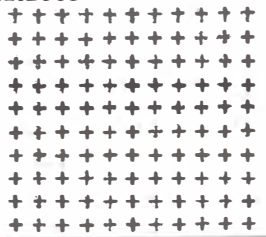
<b>Lattices</b> 	Superficie, Modelo digital de elevación, Mallas, Raster	Puntos xyz	Ninguna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Representación de superficies</li> <li>- Modelación y visualización de superficies (cortes rellenos, relieves, 3-D, pendientes)</li> </ul>
<b>Imágenes</b> 	Raster	Banda de pixeles	Ninguna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Imágenes como mapas</li> <li>- Imágenes como atributos</li> <li>- Automatización de datos</li> <li>- Visualización</li> <li>- Detección de cambio</li> <li>- Bases de datos multimedia</li> </ul>
<b>Dibujos</b> 	CAD	Capas de entidades	Ninguna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dibujos como mapas</li> <li>- Dibujos como atributos</li> </ul>

Tabla 4.3. Formas de SIG que sirven para modelar los elementos del mundo real.

#### 4.5 Áreas de aplicación del SIG

Los SIG actualmente tienen un amplio rango de aplicaciones y una buena aceptación por parte de los gobiernos, empresas privadas e instituciones de investigación. Entre estas aplicaciones está el análisis de recursos medioambientales, planificación del suelo, análisis posicional, estimación de impuestos, análisis de mercado, demografía, planificación de infraestructura, estudios de hábitat, análisis arqueológicos, entre otras muchas más. En la década pasada, el campo de aplicación del SIG se extendió al manejo de los riesgos naturales debido a las experiencias sufridas con los terremotos, huracanes, inundaciones y erupciones, entre otras, cuya peligrosidad o severidad radica en el efecto que tiene en grandes áreas, alcanzando sobre todo zonas urbanas, que en algunas ocasiones están densamente pobladas, debido a un crecimiento incontrolable y a un mal manejo urbanístico de la ciudad, como puede comprobarse en los trabajos de la OEA, 1993; ESRI, 1994; SERGISAI, 1998, entre otros. De esta manera, se observa la necesidad de manejar una gran cantidad de información, especialmente de elementos georreferenciados o espaciales que pueden verse afectados por estos fenómenos, como son los edificios, puentes, presas, líneas vitales (líneas de agua, gas, luz, fibra óptica, etc.), así como los mismos fenómenos naturales que pueden actuar.

Dentro de los programas de planificación y mitigación de desastres, el SIG permiten combinar la información de los riesgos naturales, recursos, población e infraestructura para determinar las áreas menos expuestas a los peligros, áreas aptas para las actividades de desarrollo, áreas que requieren una evaluación más detallada,

áreas donde se debería priorizar en la aplicación de las estrategias de mitigación. Por ejemplo, los mapas de peligro sísmico permiten determinar las áreas y su extensión donde se deben evitar fuertes inversiones de capital o donde se deben considerar sólo actividades menos susceptibles a terremotos. De la misma manera, estas áreas expuestas junto a datos socio-económicos y de infraestructura, pueden proporcionar el número de personas o la infraestructura, que puede estar en situación de riesgo.

Por otro lado, una vez ocurrido los desastres el SIG son esenciales para una pronta respuesta de las autoridades civiles de una manera ordenada y prioritaria en aquellos lugares donde se determinó que los daños podrían ser mayores. Los SIG, dentro de los programas de planificación determinaron las zonas con mayor probabilidad de daño, localizando a su vez, los sistemas de emergencia más cercanos y las zonas que pueden utilizarse cómo áreas de resguardo para la población.

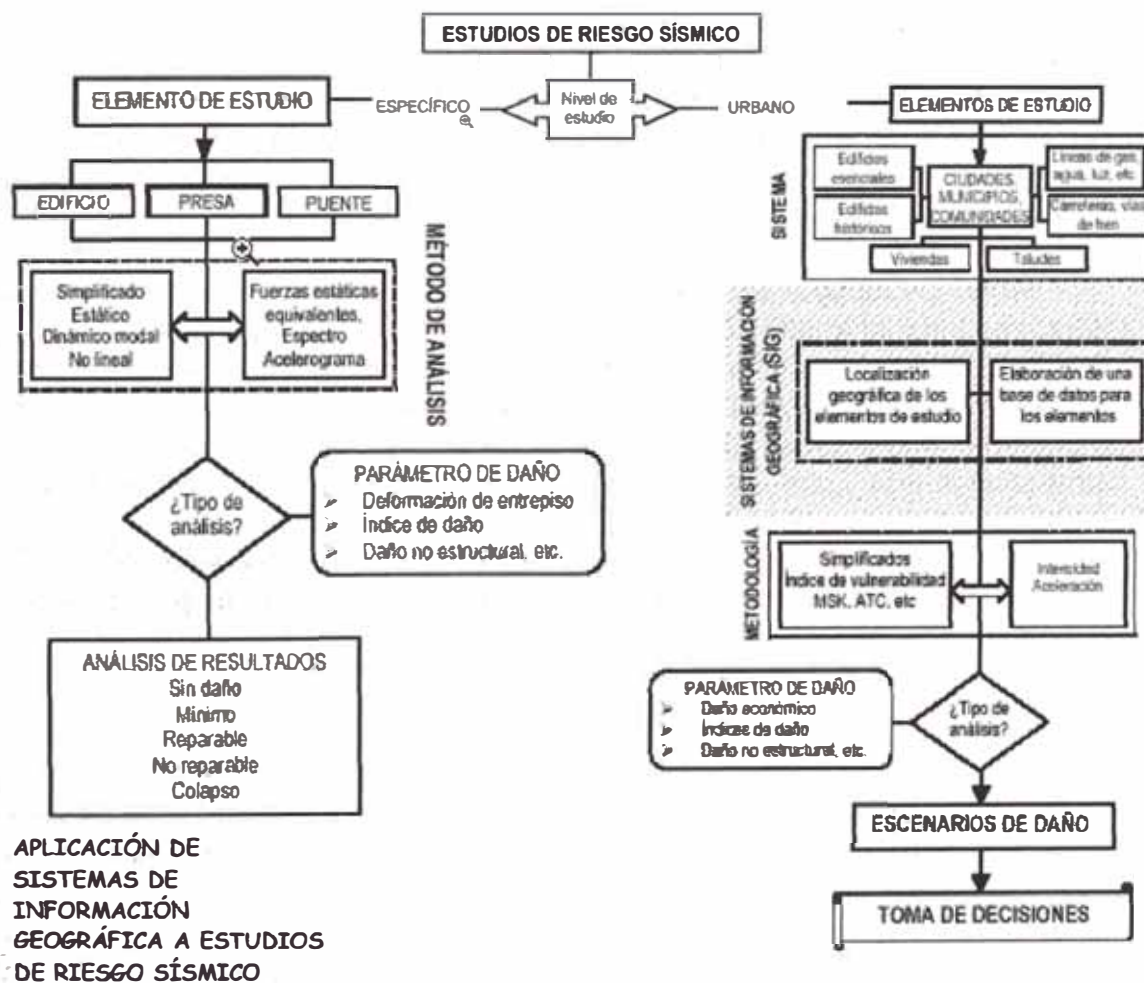


Figura 4.13. Diagrama que muestra la etapa en donde se aplican los Sistema de Información Geográfica dentro de los estudios de Riesgo Sísmico.

Sin embargo el proceso se complica cuando la información no está organizada; no existe una metodología adecuada para analizar uno o varios fenómenos al mismo tiempo; en la aplicación de las formas de mitigación propuestas o simplemente cuando

no existen las personas adecuadas para el manejo de los sistemas. Las aplicaciones del SIG en el manejo de los riesgos naturales normalmente están limitadas por la cantidad y calidad disponible de información de los elementos que se quieran estudiar y, en algunos casos, por la falta de metodologías adecuadas para los estudios. Afortunadamente, muchas instituciones, principalmente gubernamentales, han puesto un gran interés en la elaboración de esta información, mejorando y organizando los datos catastrales de las ciudades (como ejemplo, están algunos distritos de Lima).

En la figura 4.13, se muestra en forma resumida los diferentes pasos que se pueden seguir en el estudio del riesgo sísmico. Por una parte el estudio se puede realizar de una manera específica, utilizando modelos y herramientas de análisis complejos, determinando parámetros como pueden ser la deformación de entrepiso para determinar el daño de las estructuras, ó de una manera simplificada utilizando metodologías de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras para poder aplicarse a nivel urbano, para lo cual es esenciales los SIG, por la gran cantidad de información que se necesita manejar. Algunos ejemplos de la aplicación del SIG se puede ver en los trabajos de ESRI, (1994), Tatsumi et al, (1992), OEA, (1993), King et al, (1994), Polovinchik et al, (1995), Xie et al, (1996), Anagnos et al, (1996), Mena, (1997), SERGISAL, (1998), Mena et al, (2001), CISMID-UNI, en donde algunos trabajos citados tienen aplicación real en los sistemas de Protección Civil.

Uno de los trabajos en donde se hace una recopilación de algunos proyectos en diferentes áreas aplicando SIG es el de ESRI (1994). En este libro se muestra el trabajo de cientos de mapas describiendo situaciones y condiciones alrededor del mundo, como son los patrones de vegetación, redes de energía eléctrica, crimen, sismos, recursos energéticos, plagas en el bosque, geología, límites políticos, recursos de agua, entre otros muchos más. Estos trabajos han ayudado a registrar la realidad, modelar procesos científicos y realizar importantes tomas de decisiones. Con esto se puede ver el continuo crecimiento y ampliación de la tecnología SIG a muchos sectores, permitiendo crear grandes bases de datos en muchos campos de la ciencia, para hacerlos más eficientes.

#### **4.6 Resumen**

En este capítulo se hace una descripción de los sistemas de información geográfica y la importancia que tiene en los estudios donde se necesite la modelación de elementos georreferenciados, o en otras palabras, modelos que representen elementos del mundo real. Se describe la definición del SIG, así como las principales componentes que lo constituyen, entre los que se encuentran la información que se pretenden modelar, la descripción de estos elementos, el equipo informático, el software y obviamente el equipo humano

Se hace una descripción de los elementos que se utilizan para modelar el mundo real, principalmente los puntos, arcos y polígonos, siendo los elementos básicos para la construcción de las coberturas dentro del SIG. Se hace también una descripción del concepto de topología, indispensables para que estos elementos sean reconocidos por

un SIG. No obstante, estos elementos no son los únicos utilizados para representar el mundo real, también se pueden utilizar elementos más avanzados como son los TIN o GRID, con los que se puede representar superficies reales del mundo.

Finalmente, se hace un resumen de las áreas de aplicación entre las que se encuentran el análisis de recursos medioambientales, planificación del suelo, análisis posicional, estimación de impuestos, estudios de hábitat o el manejo de recursos naturales, entre los que se encuentran los estudios de riesgo sísmico.





## **CAPITULO V**

**Estudios y base de datos utilizados en la evaluación de riesgo sísmico.**

## 5. ESTUDIOS Y BASE DE DATOS UTILIZADOS EN LA EVALUACION DE RIESGO SISMICO.

### 5.1 Introducción.

La base fundamental en cualquier estudio de riesgo sísmico, es sin duda contar con las características estructurales de los elementos con los que se pretende trabajar, indispensables para evaluar la vulnerabilidad sísmica, y con esto calcular el daño probable que pueden sufrir como consecuencia de un terremoto. De esta misma forma, se requiere conocer las características del suelo en donde se encuentran localizados los elementos de estudio, debido a que los efectos locales pueden ser causantes de un mayor daño. Esto obliga a realizar un análisis de la información requerida por la metodología propuesta y de la información disponible para saber si es factible llevar a cabo el estudio, ya que en muchas ocasiones la elección de una metodología u otra dependerá de la disponibilidad de la información tanto de los elementos en riesgo como del tipo de suelo en donde se encuentren edificados. Una de las razones de este inconveniente es que los datos que se requieren de las estructuras para los estudios de riesgo sísmico, frecuentemente no existen en forma organizada y en algunos casos, aun existiendo no son fácilmente accesibles. Las metodologías que se pueden aplicar en los estudios de riesgo sísmico pueden ser muy variadas y por lo tanto, los requerimientos de la información diferentes. Un ejemplo de estos requerimientos de información se pueden ver de una manera general en los siguientes dos grupos de metodologías:

1. *Específicas.* En el caso de realizar un análisis estructural dinámico lineal de un edificio en particular, se necesita disponer de la información correspondiente a las dimensiones en planta y en elevación, las dimensiones de los elementos resistentes, las características generales de los materiales (resistencia, peso, etc.) que se utilizaron en la construcción, así como la acción de entrada (fuerzas laterales equivalentes o espectro de diseño) de la base de datos utilizada en el estudio de riesgo sísmico. Sin embargo, si se pretende realizar un análisis no lineal los requerimientos son aún más complejos, por ejemplo, se necesitan información detallada de la distribución del refuerzo longitudinal y transversal en los elementos estructurales, además de la mencionada anteriormente, así como registros de

acelerogramas de sismos reales o simulados para realizar el análisis. Con toda esta información y con el uso de algún programa de análisis lineal ó no lineal se puede obtener una aproximación suficiente del comportamiento real del edificio, con la desventaja por otra parte de la gran cantidad de información que se necesita para estudiarlo, lo que hace que estas metodologías sólo se utilicen en el caso de edificios especiales que requieran seguir funcionando después de una crisis sísmica.

2. *Urbanas*. En este caso se agrupan las metodologías para realizar estudios a nivel urbano, algunas de las cuales pueden requerir únicamente el material, ó el año de construcción. Evidentemente estas metodologías no permiten conocer el comportamiento de un edificio en particular, aunque sí se pueden usar como un resultado previo, para identificar los de mayor riesgo y realizar un estudio más detallado o como resultados que forman parte de un contexto más amplio (manzana, barrio, distrito o ciudad). Por esta razón estas metodologías son viables en los estudios a nivel urbano, ya que suponen una gran ventaja al utilizar información más general de los edificios y obviamente poder aplicarse a un gran número de ellos.

En el caso específico de la ciudad de Ayacucho, se optó por una metodología a nivel urbano para estudiar el riesgo sísmico. Este planteamiento surgió en la década pasada (Caicedo, 1993) con la introducción del método del índice de vulnerabilidad y se ha ido perfeccionando con el paso de los años. La metodología engloba los dos grandes grupos descritos en los párrafos anteriores, tomando los aspectos más importantes de ellos, es decir, por una parte se calculan algunos parámetros estructurales, como es el cortante basal o las configuraciones en planta y en elevación del edificio, y en forma más general se evalúan aspectos como puede ser la calidad de los materiales dependiendo del año de construcción. Afortunadamente, la experiencia obtenida en estos años ha permitido identificar los datos de los edificios y del suelo que necesita la metodología de riesgo propuesta, así como las fuentes donde se pueden extraer. Sin embargo, el procedimiento no es sencillo debido a la diversidad de información y, en el caso específico de Ayacucho, a la cantidad de información necesaria para alcanzar el nivel de detalle de este tipo de estudios. Por lo tanto en esta parte del trabajo se explica de una forma detallada la información con que se cuenta hasta el momento de los edificios de la ciudad y de las características del suelo con los diversos estudios realizados, y los procedimientos utilizados para la extracción de los datos, construcción de la coberturas de los elementos de estudio y la base de datos final obtenida.

## **5.2 Evaluación del peligro sísmico en la ciudad de Ayacucho.**

### **5.2.1 Introducción.**

Las ciudades situadas en áreas de peligrosidad sísmica moderada o baja tienden a menospreciar el peligro sísmico y a descuidar precauciones básicas de protección frente a los terremotos. Ello conlleva un aumento de su vulnerabilidad y, en consecuencia, suelen presentar un elevado riesgo sísmico que, a su vez, aumenta con el tiempo. Una forma de conocer el probable comportamiento sísmico de un lugar es

mediante la evaluación del peligro sísmico en términos probabilísticos, es decir predecir las posibles aceleraciones que podrían ocurrir en un lugar determinado.

### 5.2.2 Sismicidad en Ayacucho

El Perú orogénicamente hablando y, por ende Ayacucho, está situado en el Cinturón Circumpacífico o Círculo de Fuego del Pacífico, zona en la cual la ocurrencia de eventos sísmicos, ha sido y será frecuente; es un anillo volcánico y de gran actividad sísmica

En el mapa, distribución de los terremotos en el Perú, por A. Iceberg, 1925, en la obra de Steinmann, los terremotos en el Perú se clasifican en los siguientes grupos:

Tipo	Fuerza Mercalli	
1) Mundiales	X	XII
2) Terremotos grandes	VIII	XII
3) Terremotos Medianos	VII	X
4) Terremotos pequeños o locales		VII

Huamanga en dicho mapa, aparece en el grupo de Terremotos medianos, terremotos frecuentes, a veces destructivos.

El ingeniero Ernesto Deza del I.G.P., afirma que la mayoría de nuestros sismos son tectónicos el (terremoto del Cusco del 21 de mayo de 1950, fue de colapso). En el sur (donde está Ayacucho), los epicentros son principalmente continentales. Los sismos del zócalo continental y del fondo del mar son menos profundos que los de la Sierra y éstos menos profundos que los de la Selva. Según la carta sísmica (Atlas Histórico-Geográfico) y de paisajes peruanos, Ayacucho, en 50 años de sismos, de 1913 a 1963, de 18 sismos, nueve son de profundidades menores de 60 km. y nueve mayores de 60 km.

Según la incidencia sísmica, los sismos en Ayacucho pueden considerarse en tres niveles:

- 1) Mayor gravedad, colapso de viviendas y grietas grandes en las paredes.
- 2) De mediana gravedad, con grietas pequeñas en las paredes, sin destrucción o muy pocas casas caídas.
- 3) De menor gravedad, con pequeñas fisuras en las viviendas.

Por la profundidad del foco los terremotos se agrupan así:

- a) Superficiales o someros, cuya profundidad del foco es menor de 60 ó 70 km. pueden ser de origen tectónico o volcánico.
- b) Intermedios, cuya profundidad del foco está entre 60 ó 300 km. son de origen tectónico.
- c) Profundos, los terremotos, cuya profundidad del foco es cuando menos de 300 km. son de origen tectónico.

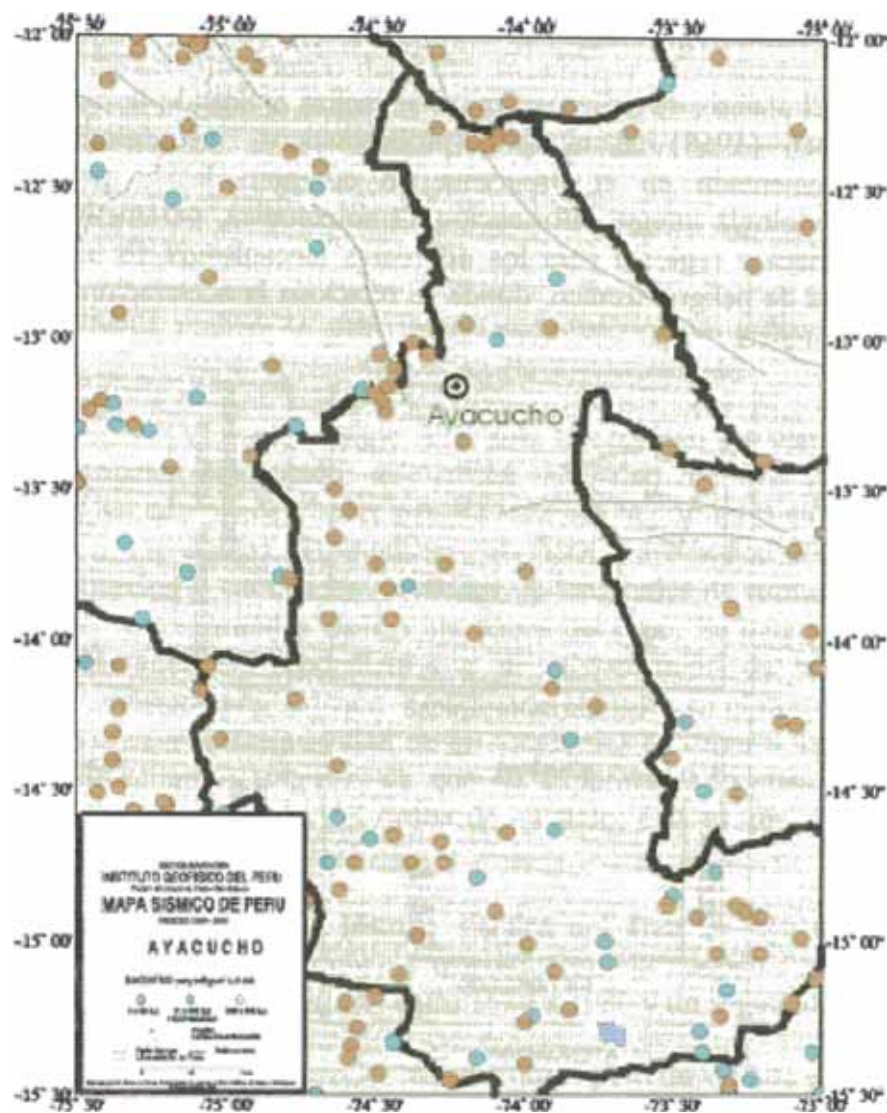


Fig. 5.1. Sismos presentados en el departamento de Ayacucho según las coordenadas indicadas, los cuales se registraron para análisis del riesgo sísmico.

En Ayacucho, desde el 16 de agosto de 1980, en que se reactiva la actividad sísmica, de un total de 21 sismos, incluyendo el del 17 de abril de 1981, hay 18 eventos, cuya profundidad está entre 33, 34 y 35 km.; dos de 25 km. y uno de 9 km., que es precisamente el del 17 de abril de 1981. Quiere decir, que el hipocentro o foco donde se originan los eventos sísmicos es superficial y, en consecuencia, causan más daños al hombre, la infraestructura y deformaciones en la corteza terrestre. En cuanto a la magnitud local, hay ocho eventos de 5 o más grados. Referente a la intensidad en M.K.S., se han registrado seis eventos de V-VI-VII.

Existe una actividad superficial causada por el proceso de reajuste tectónico del aparato andino. Se ubican agrupamientos importantes de eventos en algunas estructuras neotectónicas, tales como las fallas de Huaytapallana, fallas ubicadas en la sierra central y en Moyobamba, en donde la actividad sísmica se encuentra en los primeros 40 km de profundidad. Los sismos recientes e históricos de Ayacucho, Cusco, Urcos y norte del lago Titicaca, son manifestaciones de esta zona sísmica, muy superficial y destructiva (Ocola, 1989).



### 5.2.3 Metodología empleada

El análisis de peligro sísmico se realiza aplicando la metodología desarrollada por Cornell (1968) en términos probabilísticos, metodología que fue modificada e implementada en el programa de cómputo RISK por McGuire (1976). Esta metodología integra información sismotectónica, parámetros sismológicos y leyes de atenuación regional para los diferentes mecanismos de ruptura. El resultado es una curva de peligro sísmico, donde se relaciona la aceleración y su probabilidad anual de excedencia.

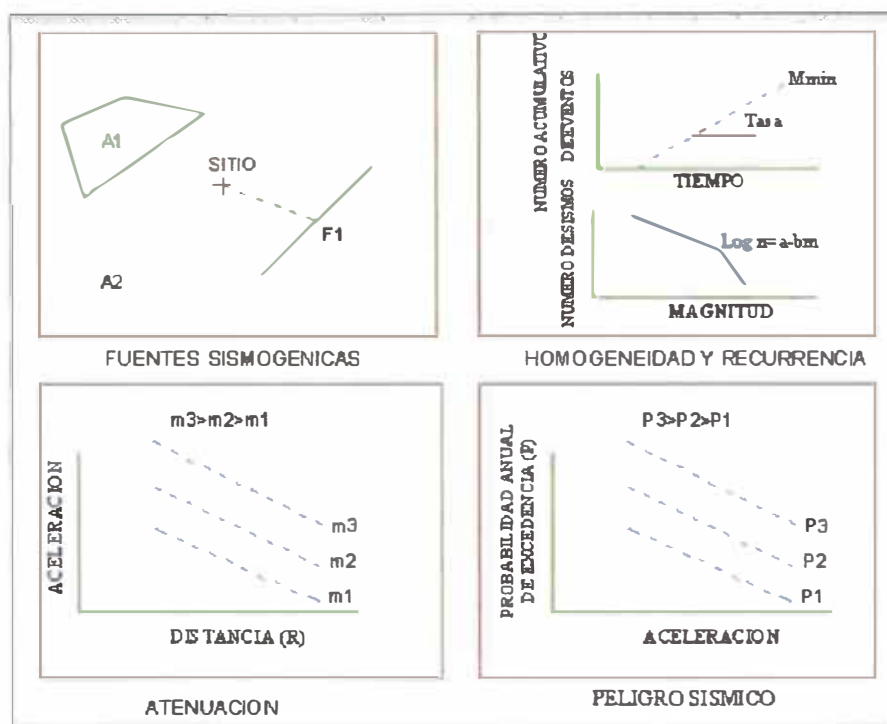


Figura 5-2. Metodología para calcular el peligro sísmico

Un esquema del procedimiento utilizado se presenta resumido en la Figura 5.2. La región a estudiarse se halla dividiendo en fuentes sismogénicas, tales como fuentes regionales A1, sismicidad de fondo A2 y fallas F1, donde los sismos pueden ocurrir de forma aleatoria. Para cada fuente se determinan, la magnitud mínima de homogeneidad ( $M_{min}$ ), la pendiente de la distribución de Gutenberg y Richter ( $b$ ), la tasa media anual de actividad sísmica ( $\mu$ ) y la magnitud máxima esperada ( $M_{max}$ ), denominados parámetros sismológicos. El nivel de aceleraciones alcanzado en el sitio de interés es determinado usando una ley de atenuación, la misma que relaciona la intensidad de movimiento del terreno (aceleración, velocidad y desplazamiento) con la magnitud y la distancia al centro de liberación de energía sísmica. Finalmente, asumiendo que la ocurrencia de sismos sigue un proceso de Poisson, se calcula la probabilidad anual de excedencia para diferentes valores de aceleraciones esperadas.

### 5.2.4 Sismicidad y vulcanismo

#### Vulcanismo

El magnetismo y vulcanismo activo se produjo en el área de estudio hace aproximadamente 12 millones de años (Era Terciaria-Cuaternaria), dando lugar a las

rocas volcánicas y piroclásticas que existen en relativa abundancia, quedando como testigo el posible cono volcánico del cerro Acuchimay. Actualmente no hay evidencia de vulcanismo activo, por lo tanto este fenómeno no tiene incidencia en la evolución geomorfológica reciente de la ciudad de Ayacucho y tampoco representa ningún peligro o amenaza para su seguridad física.

### **Sismicidad Histórica**

Silgado (1978) realizó la más importante descripción ordenada de la historia sísmica del Perú.

Desde el siglo XVI hasta el siglo XIX solo se reportan los sismos sentidos en las ciudades principales, indicando que dicha actividad sísmica no es totalmente representativa, ya que pueden haber ocurrido sismos importantes en regiones remotas, que no fueron reportados. Dorbath et. al (1990) analizaron los grandes sismos históricos y obtuvieron cantidades estimadas de longitudes de ruptura en un diagrama espacio-tiempo de los grandes sismos históricos del Perú. Se muestra la existencia de tres zonas diferentes correspondientes a la segmentación de la placa de Nazca subducida en la placa Sudamericana. La actividad sísmica en el norte y centro del país es compleja debido a la irregularidad de las longitudes de ruptura, la zona sur tiene un modelo sísmico simple y regular, ya que ha experimentado cuatro grandes sismos cuyo tiempo de recurrencia es del orden de un siglo; ésta es una zona de alto riesgo sísmico.

Para efectos de analizar la historia sísmica del área de Ayacucho es necesario subdividir en dos períodos claramente marcados por la magnitud e intensidad de los sismos ocurridos. Un primer período entre 1586 a 1980 y un segundo a partir de 1980.

Muchos de los sismos ocurridos en el primer período se han generado lejos del área de estudio, pero por su naturaleza de ser destructores, con magnitudes hasta de (8.4 Ms), sus ondas han llegado a la ciudad de Ayacucho, alcanzando en esta una intensidad de IV MM. A continuación se detallan los grandes eventos sísmicos que se han producido en el territorio peruano y que han afectado el área de estudio entre 1586 a 1980:

- ❖ 28-01-1687: Terremoto de magnitud 8.2, que sacudió la villa de Huancavelica y gran parte de la comarca. Las provincias de Huanta y Angaraes quedaron soladas.
- ❖ 17-06-1719: Sacudimiento de tierra que en Huamanga tuvo el carácter de destructor.
- ❖ 08-02-1916: Sismo de foco cordillerano que fue sentido en un área de 120,000 km<sup>2</sup> y afectó varios pueblos de la provincia de Fajardo, Huamanga, Huanta, del departamento de Ayacucho y Angaraes en Huancavelica. El pueblo de Julcamarca sufrió averías en sus construcciones.
- ❖ 24-08-1942: Terremoto en la región limítrofe de los departamentos de Ica y Arequipa, su intensidad máxima fue de IX MM, sentido con una intensidad III-IV MM, en un área elíptica de 408,000 Km<sup>2</sup> en la que se encuentra al norte

de Huaraz, al noreste de Cerro de Pasco y Oxapampa. Este de Cuzco y al sur de Moquegua; en Ayacucho alcanzó la intensidad de IV MM.

- ❖ 01-11-1947: Terremoto en la zona central del Perú, el movimiento tuvo un área de percepción aproximada de 1'300,000 Km<sup>2</sup> abarcando casi todo el territorio peruano. En la zona de Ayacucho alcanzó la intensidad de V MM.
- ❖ 24-12-1959: Sismo destructor en el departamento de Ayacucho, hubo destrucción de viviendas en los poblados de Mayobamba, Pomabamba Huahuapuquio y otros caseríos ubicados en las escarpadas laderas del río Pampas. Sismos sentidos en la ciudad de Ayacucho y pueblos vecinos.

Hasta mayo de 1980 la zona entre Huancayo y Cuzco tuvo una baja actividad sísmica, que fue ubicado cerca de las localidades de Mollepata y Limatambo, en el departamento de Cuzco. El sismo tuvo una magnitud de 4.9 Mb, alcanzando una intensidad máxima en el epicentro de 6 MSK.

El 16 de agosto de 1980, ocurrió el primer sismo sensible en el área de estudio que posteriormente fue afectada por una serie continua y persistente de sismos cuyo detalle es el siguiente:

FECHA HORA	EPICENTRO	PROFUNDIDAD	MAGNITUD. LOCAL	LUGAR	PROV. DISTR.	INTENSIDAD MSK
16-08-80 14h 22'26''	13.0°S 73.7°W	33.0 Km.	5	A 70 Km. W de la ciudad de Ayacucho.	Huamanga Ayacucho	V
10-11-80 17h 21'6''	13.0°S 73.8°W	33.0 Km.	5.3	A 50 Km. E de la ciudad de Ayacucho.	Huamanga Ayacucho	V - VII
19-11-80 18h 33'58''	13.0°S 73.8°W	33.0 Km.	5.3	A 30 Km. NE de la ciudad de Ayacucho.	Huamanga Ayacucho	IV
12-11-80 01h 58'5''	13.0°S 74.0°W	33.0 Km.	5.7	A 30 Km. NE de la ciudad de Ayacucho.	Huamanga Ayacucho	VI - VII
12-11-80 06h 15'31''	13.0°S 74.0°W	33.0 Km.	5.7	Muy cerca a la ciudad de Ayacucho.	Huamanga Ayacucho	VI - VII
12-11-80 11h 09'28''	13.1°S 74.0°W	33.0 Km.	4.5	A 50 Km. de la ciudad de Ayacucho en	Huamanga Ayacucho	III
12-11-80 16h 04'40''	12.9°S 74.2°W	33.0 Km.	4.6	A 40 Km. NE de Orccohuasi.	Huamanga Ayacucho	III
12-11-80 20h 51'24''	12.9°S 74.1°W	33.0 Km.	4.5	A 50 Km. NE de Pampahuasi.	Huamanga Ayacucho	III
12-11-80 20h 54'20''	13.0°S 74.0°W	33.0 Km.	4.8	A 50 Km. NE de San Miguel.	Huamanga Ayacucho	III
13/11/80	13.1°S 73.0°W	33.0 Km.	4.6	A 50 Km. E de la Mar.	La Mar Ayacucho	III
13-11-80 16h 56'27''	13.3°S 74.8°W	33.0 Km.	4.6	A 50 Km. SE de Churiac.	Huamanga Ayacucho	III
14-11-80 01h 32'27''	13.0°S 74.2°W	33.0 Km.	4	A 40 Km. N de Huamanguilla	La Mar Ayacucho	III
16-11-80 14h 56'20''	13.0°S 74.0°W	33.0 Km.	4	A 40 Km. N de Ayacucho	Huamanga Ayacucho	II - III
11-12-80 16h 25'33''	13.2°S 74.3°W	33.0 Km.	5.4	A 40 Km. SE de Vinchos.	Huamanga Ayacucho	IV
17-12-80 03h 45'21''	13.2°S 74.6°W	35.0 Km.	5	A 40 Km. N de Chalpapampa.	Huamanga Ayacucho	IV
24-01-81 04h 01'55''	13.0°S 73.9°W	25.0 Km.	4.8	A 30 Km. NE de Tambo.	La Mar Ayacucho	

05-02-81 08h 01'55''	12.9°S 74.1°W	33.0 Km.	4	A 30 Km. NE de Tambo.	La Mar Ayacucho	IV
16/02/81	13.5°S 74.1°W	25.0 Km.	4.8	A 30 Km. NE de Tambo.	Huamanga Ayacucho	IV
24-03-81 09h 09'38''	12.9°S 74.3°W	34.0 Km.	4	A 25 Km. de Huanta.	Huanta Ayacucho	IV
14-04-81 10h 55'29''	13.2°S 74.7°W	34.0 Km.	4.6	A 50 Km. SW de Chirlac.	Huamanga Ayacucho	V - VI
17-04-81 19h 32'33''	13.3°S 74.4°W	9.0 Km.	5.4	A 30 Km. de Mitapasamañan.	Huamanga Ayacucho	V - VI
18-04-81 09h 29'46''	13.2°S 74.4°W	21.0 Km.	4.6	A 25 Km. SW de Socos.	Huamanga Ayacucho	
21/04/81	13.2°S 74.5°W	10.0 Km.	4	A 25 Km. de Mitapasamañan.	Huamanga Ayacucho	

A partir del 16 de agosto de 1980, fecha cuando se produce el sismo de magnitud 5.1 (Mb), las áreas de los distritos de San José de Ticllas, San Pedro de Cachi, Vinchos y Santo Tomás de Pata, han sufrido una continua y alta actividad sísmica; estos fenómenos son el producto de la fuerte deformación tectónicas existentes, tal como lo demuestran las estructuras geológicas presentes, como son presencia de fallas y plegamientos de varios kilómetros de longitud que principalmente tienen una alineación SE – NW.

### Sismicidad Instrumental

La información sísmológica instrumental del Perú se encuentra recopilada en el Catálogo Sísmico del Proyecto SISRA (Sismicidad de la Región Andina, 1985), que tiene eventos desde el año de 1900.

Dentro de la metodología para el cálculo del peligro sísmico se considera que los eventos sísmicos presentan una distribución de poisson, que se caracteriza por suponer independencia entre los tiempos de ocurrencia, ya que cada uno de los sismos se considera como un evento aislado e independiente. Por ello es necesario depurar del catálogo todas las réplicas y premonitores, quedando los sismos como eventos principales.

En el catálogo sísmico depurado la estadística sísmica no es homogénea o íntegra; la mayor parte de los eventos ocurridos antes de 1960 no tienen reportada su magnitud. Sólo a partir de 1963 los datos instrumentales son más precisos, año en el cual la red de sismógrafos WWSSN (World Wide Standard Seismograph Network) estaba finalmente instalada.

El análisis de peligro sísmico se realiza en función de la magnitud. Las escalas de magnitud utilizadas son  $m_b$  y  $M_s$ , calculadas a partir de las ondas de cuerpo y de superficie respectivamente.

Se calculó la siguiente relación entre estas dos magnitudes, de manera que se pueda utilizar cualquiera de ellas para homogenizar la muestra de datos.

$$m_b = 3.30 + 0.40 M_s$$

La distribución espacial de la actividad sísmica no es uniforme. Está principalmente concentrada en los bordes de los grandes bloques tectónicos,

denominados placas tectónicas. La actividad sísmica en el Perú y áreas vecinas es el resultado de la interacción de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, y el proceso de reajuste tectónico del Aparato Andino (Ocola, 1989). Se observa que la actividad sísmica en la zona norte y centro del país está distribuida en dos fajas sísmicas longitudinales a los Andes; una occidental a los Andes y exclusivamente producto de la subducción con hipocentros mayormente superficiales y algunos intermedios; y la otra, oriental a los Andes que involucra tanto a procesos de subducción (para hipocentros de profundidades intermedias, hasta 300 km.), como también a procesos secundarios, tal como la acción compresiva del escudo brasilero contra el Cinturón Andino. Estas dos fajas sísmicas se unen en la zona de transición sismotectónica (13°-14° Sur), para constituir una sola amplia faja sísmica en la región sismotectónica del Perú (Deza, 1990).

Existe una actividad sísmica superficial causada por el proceso de reajuste tectónico del Aparato Andino. Los sismos recientes e históricos de Ayacucho, Cusco, Urcos y norte del lago Titicaca, son manifestaciones de esta zona sísmica, muy superficial y destructiva (Ocola, 1989).

### **5.2.5 Determinación de las fuentes sismogénicas y los parámetros de recurrencia para la evaluación del peligro sísmico.**

#### **Determinación de las Fuentes Sismogénicas**

La distribución espacial de la actividad sísmica y las características neotectónicas en el Perú, han permitido definir 20 fuentes sismogénicas con características sismotectónicas particulares. Se presentan estas fuentes como áreas, ya que no existen suficientes datos como para modelar las fallas como fuentes lineales.

El hecho que la actividad sísmica en el Perú es el resultado de la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca y el proceso de reajuste tectónico del Aparato Andino, nos permite agrupar a las fuentes en: fuentes de subducción y fuentes continentales.

Las Fuentes de Subducción modelan la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca. Las fuentes 1, 2, 3, 4 y 5 están ubicadas a lo largo de la costa y representan la sismicidad superficial en la zona de Benioff (0-70 Km.). Las fuentes 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 representan la sismicidad intermedia (71 a 300 Km.). La fuente 20 representa la sismicidad profunda en la superficie de Benioff (500 a 700 Km.).

Las Fuentes Continentales 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 están relacionadas con la actividad sísmica superficial andina. Las fuentes ubicadas en la zona norte frontera con el Ecuador y en el Sur, frontera con Chile, fueron definidas considerando las fuentes propuestas por Bonilla y Ruiz (1992) y Aiquel (1990), respectivamente. En la Figura 5.3. se muestra la ubicación de las Fuentes Continentales y Fuentes de Subducción Superficiales (0-70 Km.), formando 2 fajas longitudinales a los Andes. En la Figura 5.3. están ubicadas las Fuentes de Subducción Intermedias (71-300 Km.) y Profundas 500-700 Km.).



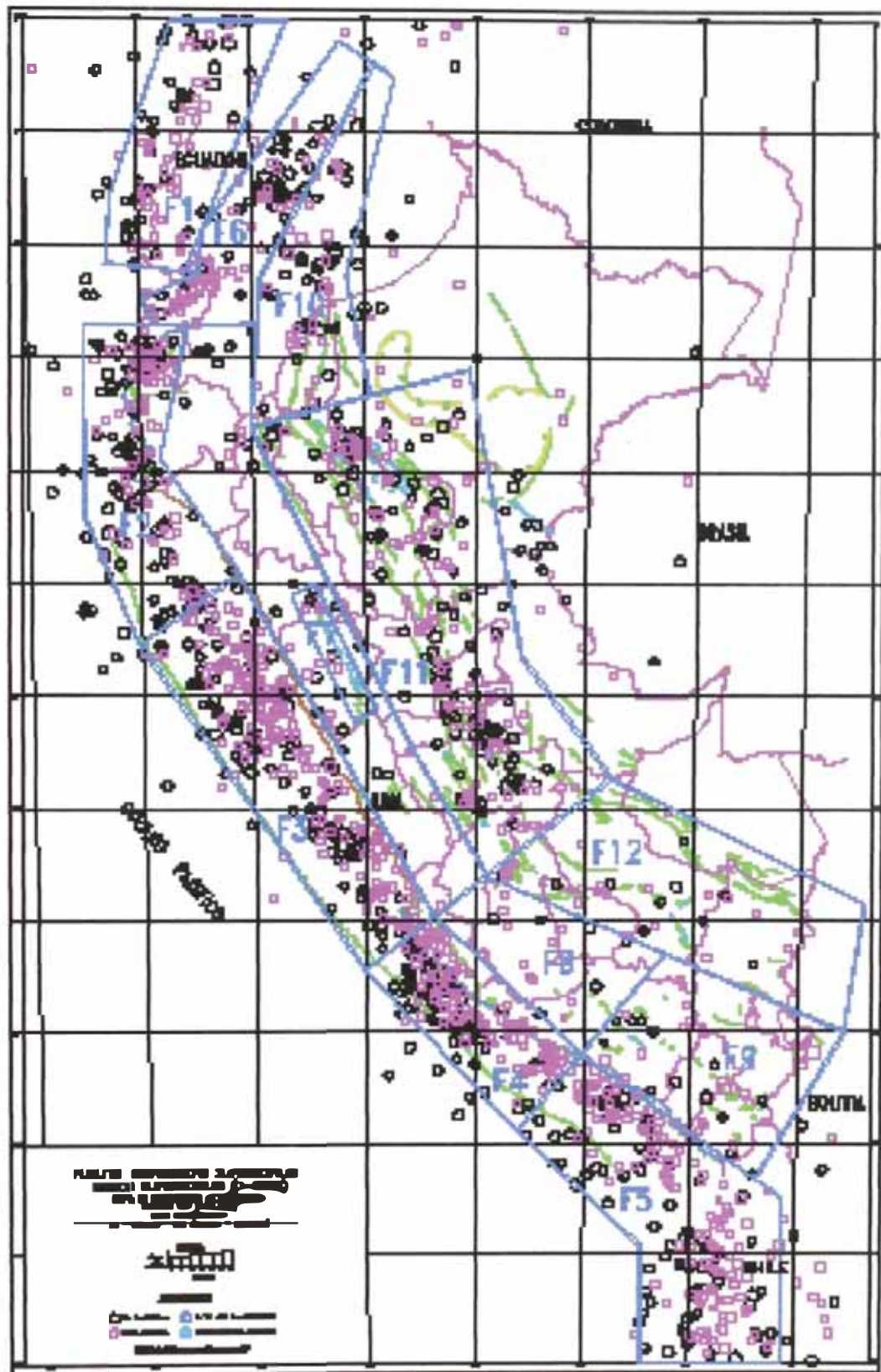
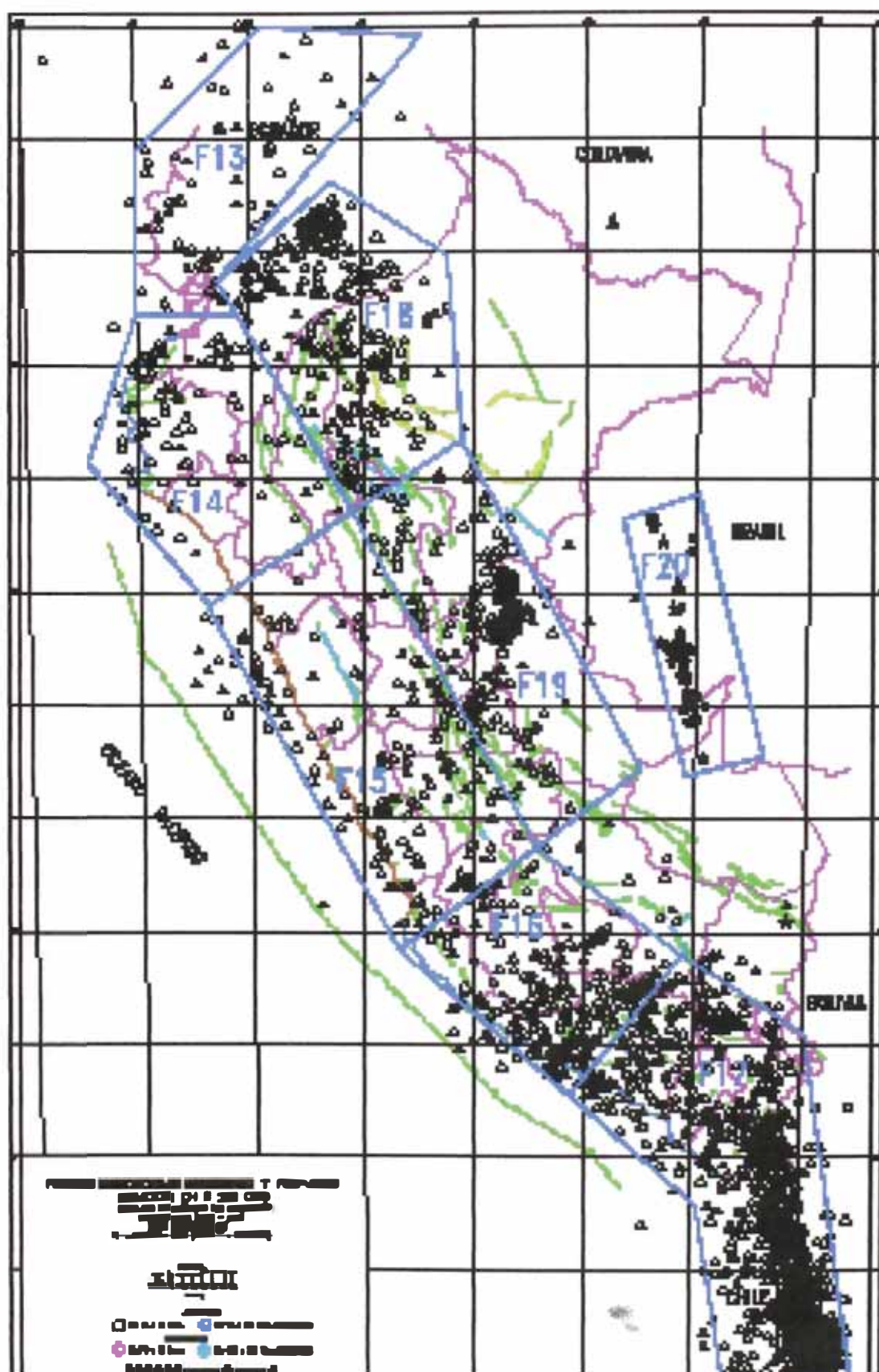


Figura 5.3. Fuentes sismogénicas superficiales. (Fuente: CISMID)



5.4. Fuentes sismogénicas intermedias y profundas. (Fuente: CISMID)

### 5.2.6 Determinación de los parámetros sismológicos

Cada una de las fuentes sismogénicas tiene características propias definidas por sus parámetros sismológicos: magnitud mínima de homogeneidad ( $M_{\min}$ ), pendiente de la distribución Gutenberg-Richter ( $b$ ), tasa media anual de actividad sísmica ( $\mu$ ) y magnitud máxima ( $M_{\max}$ ). Las escalas de magnitud más utilizadas son  $m_b$  y  $M_s$ . Dependiendo de la escala utilizada, los sismos muestran valores asintóticos a partir de una cierta magnitud (Idriss, 1985). Para evitar este problema de saturación de la magnitud se utilizará la magnitud  $M$  definida como  $\max.\{m_b, M_s\}$ .

Para determinar la sismicidad de cada zona sismogénica se utiliza la expresión de Gutenberg y Richter:

$$\text{Log } N = a - b M$$

donde:

$N$  = Número acumulativo de sismos de magnitud  $M$  ó mayor por unidad de tiempo.

$a, b$  = Parámetros que dependen de la sismicidad de la zona.

La expresión anterior se puede escribir como:

$$N = 10^a e^{-\beta M}$$

donde:

$$\beta = b \ln 10$$

Para determinar los valores de  $a$  y  $b$  se utilizó el método de la máxima verosimilitud que ajusta la recta al valor medio de los datos sobre la magnitud mínima de homogeneidad, incluida la máxima magnitud observada, normalizando el aporte que hacen los sismos de diferentes magnitudes. Esto hace que el valor de  $b$  refleje de mejor forma las características de la región (Bonilla y Ruiz, 1992).

La tasa  $\mu$  es la tasa media anual de ocurrencia de eventos mayores o iguales que la magnitud mínima de homogeneidad. Para determinar la tasa  $\mu$  se utiliza una variación del diagrama de Gutenberg y Richter, que consiste en dibujar un número acumulativo de eventos mayores a una determinada magnitud versus el tiempo. De estos gráficos se puede determinar la magnitud mínima de homogeneidad ( $M_{\min}$ ) y la tasa  $\mu$ . La magnitud mínima de homogeneidad corresponderá al gráfico cuyo diagrama acumulativo versus tiempo muestre un comportamiento lineal y monotónicamente creciente, mostrando que a partir de esa magnitud el catálogo es homogéneo y completo. La tasa  $\mu$  es la pendiente de la curva acumulativa de eventos mayores o iguales a  $M_{\min}$  versus el tiempo.  $M_{\max}$  es la magnitud máxima probable que puede ser liberada como energía sísmica (McGuire, 1976). Para determinar esta magnitud se utiliza el criterio de que el más grande evento que ha ocurrido en la fuente en el pasado, es el máximo sismo que se espera en el futuro.

En la Tabla 5-1 se presentan los parámetros sismológicos de las fuentes sismogénicas. Para determinar las profundidades representativas de los hipocentros en



las zonas sismogénicas se realizó un análisis estadístico de cálculo de frecuencias de sismos versus profundidad.

FUENTE	Mmin	Mmax	BETA	TASA	Prof. (Km)
F1	4.8	8.1	2.51	1.49	50
F2	4.8	7.9	2.6	3.28	40
F3	4.8	8	3.14	6.43	60,30
F4	4.8	8.2	3.24	3.79	30,50
F5	4.8	8.2	2.82	3.95	30,50
F6	4.9	7.4	2.67	0.44	50
F7	4.9	7.4	3.57	0.17	40
F8	4.9	7	2.42	0.19	65
F9	4.9	7.5	3.33	0.88	60
F10	4.9	7.3	2.57	0.71	50
F11	4.9	7.1	3.55	3.6	40,60
F12	4.9	7.1	4.55	0.75	50
F13	4.9	6.9	2.52	0.18	100
F14	4.9	6.5	4.75	0.86	100
F15	4.9	7.2	2.69	1.64	100
F16	4.9	7.2	3.76	3.09	80,100
F17	4.9	7.5	3.69	12.82	85,120
F18	4.9	7.5	2.29	2.43	110,180
F19	4.9	7	3.33	2.87	120,160
F20	4.9	7.5	1.69	0.75	610

Tabla 5.1 Parámetro sismológico de las fuentes sismogénicas

FUENTES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
FUENTE 1	-80.29	+02.00	-78.32	+02.00
	-81.39	-00.97	-79.65	-01.21
	-81.52	-02.39	-80.19	-02.50
FUENTE 2	-82.00	-03.39	-80.17	-03.45
	-82.00	-06.83	-80.67	-05.42
	-81.17	-09.00	-79.27	-07.90
FUENTE 3	-81.17	-09.00	-79.27	-07.90
	-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 6	-77.50	+01.58	-76.92	+01.19
	-79.83	-01.65	-78.90	-02.53
	-79.96	-02.46	-79.97	-03.43
	-80.92	-02.96	-80.79	-03.44
FUENTE 7	-78.28	-08.20	-77.86	-08.07
	-77.21	-10.47	-76.83	-10.23

FUENTE 8	-75.84 -73.00	-13.87 -16.53	-74.76 -71.41	-13.13 -14.67
FUENTE 9	-73.00 -69.71	-16.53 -18.67	-71.41 -68.12	-14.67 -16.13
FUENTE 10	-76.92 -78.90 -79.10	+01.19 -02.53 -05.20	-76.50 -77.35 -77.00	+01.00 -02.40 -04.77
FUENTE 11	-79.10 -76.34 -74.76	-05.20 -10.67 -13.13	-75.10 -74.17 -72.48	-04.33 -09.33 -11.40
FUENTE 12	-74.76 -69.12	-13.13 -16.13	-72.48 -67.76	-11.40 -13.80
FUENTE 13	-78.73 -81.00 -81.00	+02.00 -00.67 -03.07	-76.00 -79.59 -79.20	+01.82 -02.55 -03.07
FUENTE 14	-81.00 -81.93 -79.80	-03.07 -05.73 -08.13	-79.20 -78.60 -77.17	-03.07 -04.00 -06.53
FUENTE 15	-79.80 -76.38	-08.13 -14.30	-77.17 -73.86	-06.53 -12.46
FUENTE 16	-76.38 -73.28	-14.30 -16.87	-73.86 -71.21	-12.46 -14.40
FUENTE 17	-73.28 -70.86 -70.38	-16.87 -18.80 -22.00	-71.21 -68.93 -67.98	-14.40 -15.73 -22.00
FUENTE 18	-79.59 -78.60 -77.17	-02.55 -04.00 -06.53	-77.50 -75.51 -75.27	-00.73 -02.06 -05.33
FUENTE 19	-77.17 -73.86	-06.53 -12.46	-75.27 -72.03	-05.33 -11.13
FUENTE 20	-72.31 -71.14	-06.67 -11.30	-71.00 -69.69	-06.33 -10.93

Tabla 5.2 Coordenadas Geográficas de las fuentes sismogénicas de Subducción y Continentales

### Leyes de Atenuación

Se utilizaron dos leyes de atenuación de aceleraciones, la primera es la propuesta por Casaverde y Vargas (1980), y ha sido empleada para las fuentes asociadas al mecanismo de subducción. Esta ley está basada en los registros de acelerógrafos de las componentes horizontales de diez sismos peruanos registrados en Lima y alrededores.

Es notorio la menor atenuación de los sismos peruanos en comparación con atenuaciones de sismos en otras partes del mundo. Los sismos fueron registrados en acelerógrafos instalados en el local del Instituto Geológico en la Plaza Habich, en el Instituto Geofísico en la Avenida Arequipa; en Zárate; en la casa del Dr. Huaco en las Gardenias y en la Molina, la ley es:

Atenuación de aceleraciones:

$$a = 68.7e^{0.8M_s} (R + 25)^{-1.0}$$



Donde:

$a$  = es la aceleración en  $\text{cm}/\text{seg}^2$ .

$M_s$  = es la magnitud de ondas superficiales.

$R$  = es la distancia hipocentral en km.

Es evidente que existe escasez de datos de registros de aceleraciones en el Perú. Los datos que se tienen son de la ciudad de Lima.

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 empleada para las fuentes asociadas a sismos continentales.

Esta ley tiene la forma:

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

Donde:

$a$  = es la aceleración en  $\text{cm}/\text{seg}^2$ .

$M_s$  = es la magnitud de ondas superficiales.

$R$  = es la distancia hipocentral en Km.

### 5.2.7 Evaluación de peligro sísmico

El peligro sísmico se define por la probabilidad que en un lugar determinado ocurra un movimiento sísmico de una intensidad igual o mayor que un valor fijado. En general, se hace extensivo el término intensidad a cualquier otra característica de un sismo, tal como su magnitud, la aceleración máxima, el valor espectral de la velocidad, el valor espectral del desplazamiento del suelo, el valor medio de la intensidad Mercalli Modificada u otro parámetro.

La ocurrencia de un evento sísmico es de carácter aleatorio y la teoría de las probabilidades es aplicable en el análisis del riesgo de su ocurrencia. Aplicando esta teoría se puede demostrar que si la ocurrencia de un evento A depende de la ocurrencia de otros eventos :  $E_1, E_2, \dots$ . Es, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos; entonces, de acuerdo al teorema de la "Probabilidad Total" se tiene para la probabilidad de ocurrencia de A:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A/E_i) * P(E_i)$$

donde  $P(A/E_i)$  es la probabilidad condicional que A ocurra, dado que  $E_i$  ocurra.

La intensidad generalizada ( $I$ ) de un sismo en un lugar fijado puede considerarse dependiente del tamaño del sismo (la magnitud o intensidad epicentral) y de la distancia al lugar de interés. Si el tamaño del sismo ( $S$ ) y su localización ( $R$ ) son considerados como variables aleatorias continuas y definidas por sus funciones de densidad de probabilidad,  $f_S(s)$  y  $f_R(r)$  respectivamente; entonces, el peligro sísmico definido por la probabilidad que la intensidad  $I$  sea igual o mayor que una intensidad dada, será:  $P(I \geq I_0)$  y está dada por:

$$P(I \geq i) = \iint P[I/(s, r)] f_s(s) f_r(r) ds dr$$

Esta es la expresión que resume la teoría desarrollada por Cornell en 1968, para analizar el peligro sísmico. La evaluación de esta integral es efectuada por el programa de cómputo RISK desarrollado por McGuire (1976) en el cálculo del peligro sísmico.

### Nivel de confianza

En el presente estudio de peligro sísmico, el nivel de excedencia ( $RISK_t$ ) y probabilidad extrema se definen como la probabilidad que en un tiempo determinado (tiempo de vida útil) ocurra un sismo de intensidad igual o mayor a una intensidad dada. El nivel de excedencia se expresa de la manera siguiente:

$$RISK_t = 1 - e^{-\frac{t}{Ry(a)}}$$

donde:

t : tiempo de vida útil

Ry(a) : período de retorno promedio en años de un sismo de intensidad > a.

El nivel de confianza se expresa como:

$$\text{Nivel de confianza} = 1 - RISK_t$$

Los movimientos de diseño que el ingeniero debe seleccionar están asociados a un nivel de excedencia suficientemente pequeño durante la vida útil de la edificación. En la Tabla 5-3 se muestran valores representativos de criterios empleados en la selección de movimientos sísmicos de diseño (Grases, 1989). La selección de los movimientos sísmicos depende del tipo de obra.

Tipo de obra	Vida útil (t años)	Probabilidad de excedencia	Tiempo 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	>5,000
- Equipos de S/E eléctricas de alto voltaje.	50	0.03	1,600
- Puentes o viaductos de arterias principales.	100	0.10	950
-Tanques de almacenamiento de combustible.	30	0.05	590
- Edificaciones para viviendas.	50	0.10-0.20	225/500
-Construcciones temporales que no amenacen obras de importancia mayor.	15	0.30	40

Tabla 5-3 Valores representativos de criterios empleados en la selección de movimientos sísmicos de diseño

En el presente estudio se considera el 90% de nivel de confianza para 50 y 100 años de vida útil (t) que corresponden a 475 y 950 años de período de retorno respectivamente, es decir el 10% de nivel de excedencia en un periodo de t años,

además se tomará un sismo ocurrido en los años 80 en la ciudad de Ayacucho que corresponde al 10% de nivel de excedencia en 25 años de periodo de retorno.

### 5.2.8 Aceleraciones máximas esperadas

Calculados los parámetros sismológicos de las fuentes ( $M_{\min}$ ,  $M_{\max}$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ), las profundidades representativas de los hipocentros de las fuentes y seleccionadas las leyes de atenuación, se calcularon las aceleraciones horizontales mediante el programa RISK en una malla de 45 puntos. En las láminas 02 y 03 se muestran los mapas de isoaceleraciones para 50 años y 100 años de vida útil.

Se observa que para 50 años de exposición sísmica y 10 % de excedencia, el valor de la aceleración máxima esperada para la ciudad de Ayacucho es de 0.32g y para 100 años de exposición sísmica la aceleración máxima esperada alcanza un valor de 0.37g.

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 la interacción suelo-estructura, ambos aspectos serán tratados más adelante.

En el análisis del riesgo sísmico se evaluarán para tres sismos escenarios:

- ❖ Sismo para un tiempo de exposición de 50 años con una probabilidad de excedencia del 10% (período de retorno de 475 años).
- ❖ Sismo para un tiempo de exposición de 100 años con una probabilidad de excedencia del 10% (período de retorno de 950 años).
- ❖ Sismo ocurrido en los años 1980 y 1981 de 0.1g a nivel de basamento rocoso, que corresponde a un sismo de un período de retorno de 25 años con un nivel de excedencia de 10%.

Los sismos escenarios han sido elegidos de acuerdo al criterio de Grases (1989) los cuales se muestran en la tabla 5.3.

Sismos escenarios	PGA
25 años de período de retorno	0.10 g
475 años de período de retorno	0.32g
950 años de período de retorno	0.37g

### 5.3 Condiciones geológicas y geomorfológicas

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 Ayacucho, 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

### Hidrológico

- 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.

### 5.3.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio tiene la siguiente ubicación política

Distrito	:	Ayacucho
Provincia	:	Huamanga
Departamento	:	Ayacucho

y presenta la siguiente ubicación planialtimétrica

Coordenada Norte:	De 8'542,000 m. a 8'547,500 m.
Coordenada Este	De 582,800 m. a 586,500 m. .
Altitud	De 2,615.000 m.s.n.m. a 2,900.000 m.s.n.m.

La ubicación del área de estudio se presenta en la lámina N° 01

#### Acceso y vías de comunicación al área de estudio

El acceso al área de estudio se realiza desde Lima mediante la utilización de la carretera principal asfaltada Panamericana Sur hasta llegar al Distrito de San Clemente de Pisco luego de un recorrido de 225.0 Km; desde éste punto y utilizando la carretera asfaltada denominada “Los Libertadores” se llega a Ayacucho luego de cruzar los centros poblados de Huaytará, Apacheta, Niñobamba, Jatumpampa y Huascaura con un recorrido aproximado de 330.0 Km.

En total desde Lima hasta Ayacucho se efectúa un recorrido estimado de 555.0 km. y un tiempo de viaje en camioneta de aproximadamente 7 a 8 horas.

Estando ya en la ciudad de Ayacucho se puede acceder a los diferentes barrios, urbanizaciones, asociaciones, áreas de expansión urbana, etc., que conforma el distrito de Ayacucho utilizando diversos caminos, vías asfaltadas, calles avenidas y arterias que conducen a dichos lugares específicos de ubicación.

#### Condiciones climáticas del área de Estudio

El área de estudio goza de un clima templado a cálido con una temperatura ambiental media anual del orden de 17° C, precipitación promedio multianual de 550.0 mm., humedad relativa media anual de 60% y valores de evaporación total media anual de alrededor de 1,800.00 mm., acorde a la información meteorológica registrada en la Estación Climatológica de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH) ubicada al interior del campo universitario y que se puede considerar representativa para el área de interés.

Usualmente no se suelen suceder heladas, sin embargo, las temperaturas extremas mínimas ocurren durante los meses de Mayo y Junio con valores hasta de alrededor de 2° C pero que no tienen mayores efectos significativos en los cultivos de tipo agrícola.

El clima del área de estudio es propicio para una agricultura intensa, pudiéndose cultivar papa, maíz, frutales, hortalizas y otros.



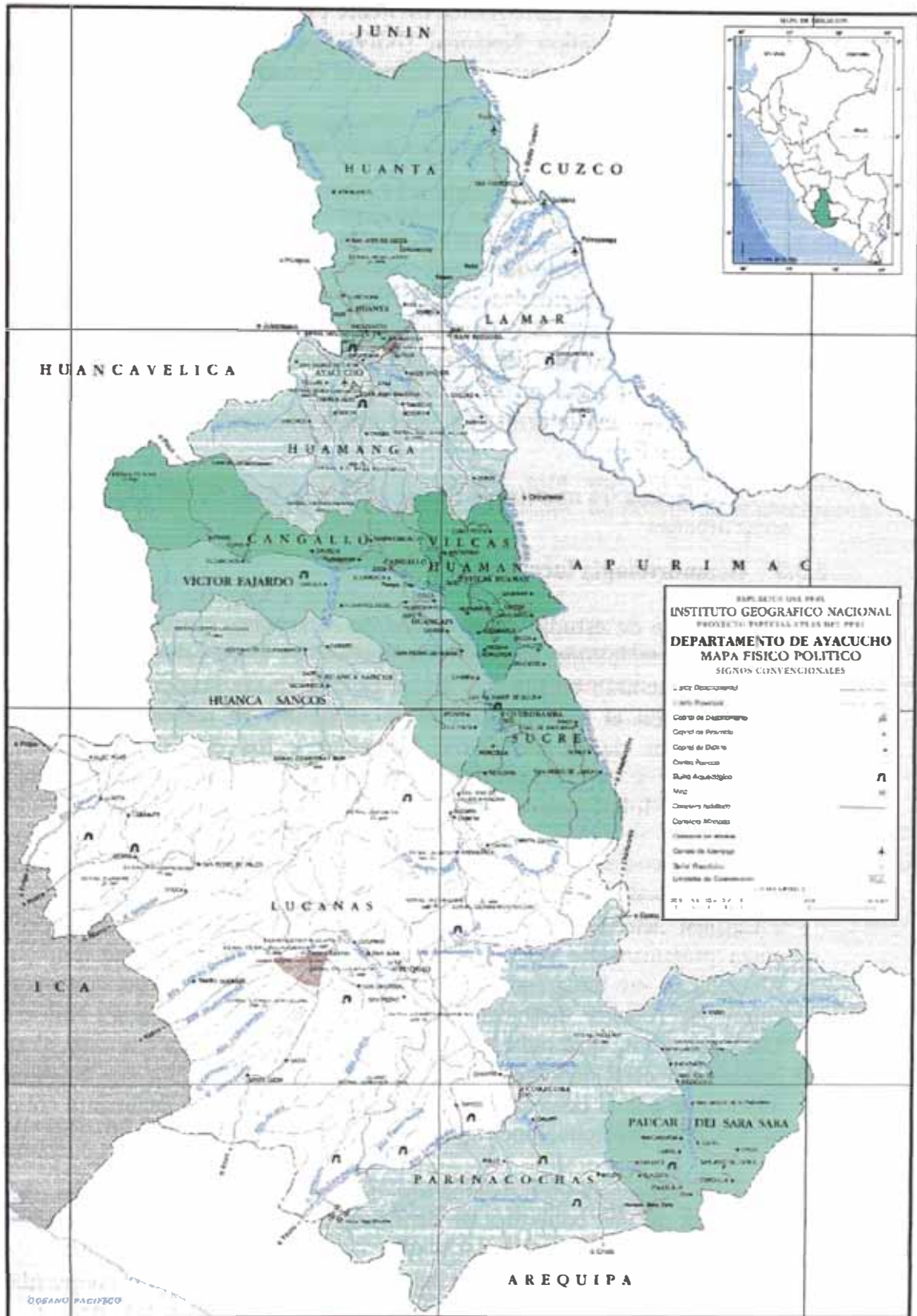


Figura 5.5 Departamento de Ayacucho

### 5.3.2 Topografía

La información cartográfica existente para el área de estudio ha sido colectada en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y en la Dirección de Catastro Rural del Ministerio de Agricultura cuyas oficinas se encuentran ubicadas en la ciudad de Lima, acorde al detalle siguiente:

- Carta Nacional del Cuadrángulo de Ayacucho (hoja 27-ñ) a escala 1:100,000.
- Planos catastrales a escala 1:25,000

La información Topográfica existente para el área de estudio comprende los planos catastrales obtenidos por restitución aerofotogramétrica de las fotografías aéreas de vuelo efectuadas por el SAN en el año de 1996. De dicha información aerofotogramétrica ha sido posible obtener un plano catastral a escala 1:5,000 y curvas de nivel cada 5.00 m., del área de estudio; que han sido finalmente afinadas por el grupo consultor CES en el año 1999 y por COFOPRI en el año 2001; contando finalmente con una información fidedigna y adecuada para efectos de los trabajos del presente estudio.

La lámina 04 muestra la topografía de la zona en estudio, en la cual se indica las áreas urbanas.

### 5.3.3 Geomorfología local

El área de estudio de la ciudad de Ayacucho, corresponde a nivel regional a la unidad geomorfológica denominada Penillanura Disectadas y a nivel local en unidades que se encuentran en función de las características predominantes de cada ubicación específica. En el área en estudio se encuentra en mayor proporción los depósitos sedimentarios de la formación Ayacucho y los depósitos aluviales recientes del Cuaternario y se encuentran en menor proporción depósitos volcánicos de la formación Molinayoc que suprayacen a depósitos sedimentarios de la formación Ayacucho.

El área del distrito de Ayacucho y el límite con los distritos de San Juan Bautista y Carmen Alto se encuentra disectada por el curso principal del río Alameda; que cruza prácticamente por el centro y a lo largo de la ciudad de Ayacucho. Al río Alameda se van integrando a lo largo de su recorrido diversas quebradas afluentes, de entre las cuales destacan por su magnitud: quebrada Huascura, quebrada Chaquihuaycco, quebrada Accohuaycco y otras menores que tienen su origen en las laderas del cerro denominado “La Picota”; el cual resulta ser un agente de erosión importante por la presencia de cobertura coluvio-aluvial fácilmente erosionable ante la presencia de precipitaciones líquidas intensas.

La presencia del sistema de quebradas antes mencionadas, ha originado la existencia de una cobertura de depósitos aluviales de potencia variable según el área que se trate. La potencia del aluvial es mayor en el casco urbano de la ciudad de Ayacucho y es menor sobre las laderas de pendientes baja a pronunciada que se ubican sobre ambos márgenes del valle del río Alameda. Estos depósitos aluviales se encuentran sobreyaciendo básicamente a depósitos de origen sedimentario de la formación Ayacucho y su compacidad va desde suelta en las laderas hasta medianamente compactas en las zonas planas. Los procesos erosivos más intensos se presentan fundamentalmente en las áreas cubiertas por depósitos aluviales.

De acuerdo a la información presentada en el lámina 04, en la ciudad de Ayacucho y áreas circundantes, se pueden diferenciar las siguientes unidades geomorfológicas:

### **1.- Unidades de laderas**

#### **a) Laderas de pendiente Suave**

Esta sub unidad comprende a aquellas áreas que tienen forma de abanico, amplia extensión y baja inclinación, y que comprenden a las partes bajas donde asista a ciudad de Ayacucho y la mayoría de nuevas expansiones urbanas, como Mollepata por ejemplo.

Se extiende desde la cota aproximada de 2730 m.s.n.m. hacia el este en el límite con el río Huatatas, hasta la cota promedio de 2900 m.s.n.m. que corresponde a las partes bajas de las laderas de los cerros que circundan a la ciudad, predominantemente hacia el oeste y sur de la misma.

Desde el punto de vista urbanístico, esta sub unidad geomorfológica es importante porque, debido a sus grandes extensiones, ha permitido el crecimiento de la ciudad de Ayacucho.

#### **b) Laderas de pendiente pronunciada**

Esta sub unidad se extiende desde la cota promedio 2900 m.s.n.m hasta los vértices de los cerros que rodean la ciudad, cuya altitud varía de 3450 hasta 3700 m.s.n.m.

El relieve de esta sub unidad es bastante irregular, especialmente la zona ubicada al oeste de la ciudad, donde se halla bisectada por una serie de quebradas. La pendiente de las laderas altas es variable de 25 a 75°, siendo en algunos tramos cercana a la vertical, especialmente las partes más elevadas. Las pendientes más pronunciadas generalmente corresponden a afloramientos de tobas rosadas competentes (Miembro 2 Formación Ayacucho), mientras que los taludes abruptos corresponden a material suelto de cobertura.

Las laderas de fuerte pendiente que ofrece esta sub unidad, no son convenientes para asentamientos urbanos, sin embargo algunos de ellos se ubican sobre ellas, especialmente en las laderas del cerro La Picota, con los riesgos que traen consigo.

### **2.- Unidad de ríos y/o quebradas**

Las laderas de pendiente suave y pronunciado, descritas anteriormente, se hallan bisectadas por los ríos Alameda y Huatatas, y una serie de quebradas, como las de Ñahuinpuquio y Puracuti, por nombrar a las más importantes.

Las quebradas que merecen atención especial, son las que cortan el cerro La Picota, que nacen en las partes altas y descienden aproximadamente hasta la cota 2700 m.s.n.m y se pierden prácticamente dentro del medio urbano de la ciudad de Ayacucho, depositando, sobre ella, material de arrastre en época de lluvias. Estas quebradas son en número de 9 y drenan del cerro La Picota hacia la ciudad, con un sistema sub paralelo de dirección oeste-este, cauce angosto, profundidad variable

desde unos pocos metros hasta 40 metros, taludes con alto grado de inclinación y con una pendiente de fondo que oscila entre 10 y 30°.

### **5.3.4 Geología del área de estudio**

#### **5.3.4.1 Geología Regional**

Las unidades estratigráficas que afloran en la región, están comprendidas entre el paleozoico y el cuaternario reciente. De la más reciente son como siguen:

##### **1.- Grupo Mitu**

Con esta denominación se conoce a una secuencia volcánica algo abirragada, que al norte de Vinchos se expone en ambos flancos del río Cachi. Su composición predominante es andesítica, pero sufre variaciones litológicas y texturales tanto en sentido vertical como lateralmente. Regionalmente a esta unidad se le asigna una edad comprendida entre el Permiano superior y el Triásico inferior.

##### **2.- Formación Socos**

Con este nombre se agrupa un potente grupo de rocas sedimentarias de ambiente continental. Sus afloramientos más representativos se exponen de sur a norte en las localidades de Socos, Vinchos y San Pedro de Cachi. En su conjunto presenta una colocación marrón rojiza, con algunos niveles blancos por la presencia de capas de yeso. Esta constituida por conglomerados hacia la parte superior, luego areniscas finas en los niveles intermedios, terminando la secuencia con lodolitas y lutitas hacia la parte inferior.

##### **3.- Formación Huanta**

Litológicamente está constituida por arenisca arcósicas de grano medio y microconglomerados de color rojo intenso y capas de yeso lenticular. Los clastos de los microconglomerados son redondeados en una matriz tufácea-arcillosa. Esta secuencia muestra buenas estructuras sedimentarias de estratificación cruzada que evidencian un ambiente y aporte fluvial. Tanto lateral como verticalmente las areniscas son seguidas por conglomerados heterogéneos con cantos de cuarcitas calizas, ranitos y rocas volcánicas en una matriz areno-tufácea de color gris. Esta formación se ubica por encima de la formación Socos.

##### **4.- Formación Ayacucho**

Esta formación se halla dividida en tres miembros que afloran entre Ayacucho y Huanta, los mismos que tienen características litológicas propias; y son como siguen.

###### **a) Miembro Ayacucho 1**

Corresponde al miembro inferior que descansa sobre la formación Huanta. Litológicamente está constituido por areniscas arcósicas de grano grueso a medio, con estratificación cruzada bien marcada y tobas blancas de composición dacítica. Las tobas son de grano grueso a fino, de poca cohesión y con buena proporción de biotita.



**b) Miembro Ayacucho 2**

Este miembro se caracteriza por ser una toba masiva de color rosado, la cual ocupa gran parte de la cuenca de Ayacucho. La toba tiene una composición que varía de riolítica a dacítica y textura porfirítica con grandes fenocristales de feldespatos, especialmente plagioclasa que llegan a los 5 mm. de diámetro en un matriz de grano grueso constituida por vidrio volcánico, cuarzo y feldespatos.

**c) Miembro Ayacucho 3**

Está constituido por una serie compuesta de arenisca y lodolitas de naturaleza tobácea, que descansa sobre las tobas masivas del miembro Ayacucho 2. Aflora en el sector sur de Ayacucho, en los alrededores de Carmen Alto, donde constituyen una secuencia de arenisca notablemente compacta. Las areniscas Carmen Alto, por su gran compactación, merecen especial atención, ya que son utilizadas como material de construcción en diversas edificaciones de la ciudad de Ayacucho.

**5.- Volcánico Molinoyocc**

Corresponde a eyecciones de lavas de composición andesítica y basáltica del Piloceno superior. Estas emanaciones son de tipo fisural y se exponen en toda la zona de Ayacucho, mayormente como derrames y a veces como silis o diques.

Estratigráficamente se hallan por encima del miembro 3 de la formación Ayacucho. Las lavas son andesíticas gris verdosas en la base y presentan fracturamiento según los sistemas N70-80°E y N20-30°W de buzamiento esencialmente vertical. En la parte superior las lavas son de composición basáltica y tonalidad oscura tal como se observa en los cortes de la carretera Ayacucho-Huanta.

En la parte alta de la secuencia se presenta un basalto escoreaceo con abundantes vacuolas, el mismo que aflora como sombrero en las cumbres de los cerros Campanayoc Atumpampa y Buena Vista, mostrando una posición casi horizontal.

Las lavas, debido a su dureza, han protegido de la erosión, en muchos lugares, a las areniscas y limolitas de la formación Ayacucho, jugando un papel importante en el desarrollo geomorfológico. Por encontrarse ubicado por encima del miembro 3 de la formación Ayacucho, se le considera de una edad Terciaria superior.

**6.- Diatomita Quicapata**

Se sitúa en el sector sur de la ciudad de Ayacucho, en las inmediaciones del fundo Quicapata abarcando una extensión de 1.1 km<sup>2</sup> aproximadamente. Litológicamente constituyen una roca de color blanco, de grano muy fino, liviana, compuesta esencialmente de sílice de aspecto friable, suave al tacto y con buena cohesión de sus granos. Estratigráficamente se ubican por encima de los volcánicos Molinayocc.

**7.- Volcánico Acuchimay**

Es una secuencia piroclástica que se ubica por encima de las diatomitas Quicapata y se exponen claramente en la margen derecha del río Alameda cerca de Ayacucho. Se encuentra a manera de costras constituidas por materiales que han sido lanzados al aire para luego consolidarse a manera de bombas de color rojizo, acumulados cerca de la probable chimenea volcánica en el cerro Acuchimay. Litológicamente son de



composicion andesítica, color oscuro, textura afanítica, pero algo porosa por las pequeñas vacuolas dejadas por el escape de gases durante en enfriamiento.

## **8.- Depósitos pleistocénicos**

### **a) Depósitos conglomeráticos**

Están representados por conglomerados de considerable grosor depositados en parte como acumulaciones de materiales acarreados por corrientes fluviales en una época de intensas precipitaciones. Estos materiales se depositaron en las márgenes de una antigua laguna y en la actualidad se les observa adosados a las laderas que hoy bordean el sector oeste de la ciudad de Ayacucho. Están constituidos por cantos heterogéneos de formas angulosas a sub angulosas, con tamaños que varía, con tamaños entre 10 y 30 centímetros, provenientes de rocas volcánicas de naturaleza andesítica, riolítica, dacítica y granítica, englobados en una matriz arenosa de grano medio a grueso. El sector nor-oeste de la ciudad de Ayacucho, se les explota como material de construcción.

### **b) Depósitos lacustres**

En discordancia con los conglomerados anteriores, se encuentran una secuencia de arenisca tobácea retrabajadas y arcillosas poco diagenizadas, y que constituyen las peniplanicies donde se asienta la ciudad de Ayacucho. En el corte de la quebrada Puracuti alcanzan espesores de 40 a 50 metros, constituidas por arcillas de color rojo a rosáceo, aspecto poroso y con contenido de carbonatos que cementan el depósito.

## **9.- Depósitos recientes**

### **a) Depósitos coluviales**

Se trata de sedimentos que generalmente se ubican en las partes bajas de laderas de alta pendiente. Están compuestos por materiales inconsolidados o débilmente consolidado, con bloques angulosos de diferente tamaño en una matriz arenosa limosa, acumulados principalmente por acción de la gravedad.

### **b) Depósitos aluviales**

Están consolidados por arenas y gravas de poco transporte, con clastos subangulosos de tamaño mediano, de naturaleza mayormente volcánica y con grosores estimados entre 20 a 30 metros. Estos depósitos constituyen los últimos transportes de materiales de una edad reciente, por tanto tienen poca cohesión y litificación, sin material cementante. Se hallan en el fondo del río Alameda y en las quebradas adyacentes que cruzan la ciudad de Ayacucho.

### **5.3.4.2 Geología local**

Este trabajo se desarrolló utilizando como información base el plano topográfico; el cual ha permitido ir delineando en base a las observaciones de campo en sitios tales como cortes de quebradas, afloramientos rocosos, zanjas de cimentación, zanjas de drenaje y trincheras artificiales, el límite de contorno de las formaciones geológicas. Previamente a este trabajo, el plano topográfico ya contenía en forma expeditiva la información referida a la clasificación SUCS de los suelos encontrados en cada una de

las “calicatas” de investigación y “puntos de muestreo de roca”; de manera que ha permitido de una manera fácil y rápida confirmar la información mediante indicadores geológicos de campo y toma de muestras para su estudio y comprobación en gabinete; además de reconocer y complementar la misma en las áreas nuevas de expansión urbanística.

Como resultado del levantamiento geológico de la ciudad de Ayacucho y áreas adyacentes, se pudo determinar que las rocas existentes son de origen sedimentario y volcánico cuyas edades oscilan entre Terciario superior y Cuaternario reciente.

Las unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente, se distribuyen en el área de estudio tal como se presenta en la lámina 07, de acuerdo a la descripción siguiente:

### **1.- Tobas volcánicas**

Corresponden al miembro N°2 de la formación Ayacucho, y se caracterizan por tener aspecto masivo, color rosado, composición riolítica a dacítica, textura porfírica y buena compactación.

Se evidencia a manera de una franja longitudinal de sur a norte y ocupan la parte intermedia a alta de las laderas del cerro La Picota y prolongaciones hacia el este de la ciudad.

### **2.- Arenisca tobáceas**

Pertencen al miembro N°3 de la formación Ayacucho, y se caracterizan por presentarse estratificadas, de color gris, granulometría fina a media y con una compactación variable de muy buena a regular.

Se ubican por encima de las tobas del miembro N°2 y sirven de basamento a las rocas volcánicas y depósitos de edad más reciente. Sus mayores exposiciones están en Carmen Alto, en un amplio sector comprendido entre la quebrada Ñahuinpuquio y río Huatatas y en las laderas de los cauces de los ríos Alameda y Huatatas, sirviendo de base a la delgada capa de piroclásticos que cubre la terraza del aeropuerto.

### **3.- Lavas y piroclásticos.**

Comprenden a los volcánicos Molinoyoc, y se caracterizan por tener composición andesítica a basáltica. Hacia la base se disponen como masas aglomeráticas con pseudoestratificación casi horizontal y composición más andesítica; hacia la parte alta una secuencia de basaltos escoriáceos con abundantes vacuolas por escape de gases.

Presentan alta dureza y resistencia, sin embargo se hallan fracturados, según sistemas N70°-80°E y N20°-30°W con buzamientos cercanos a la vertical.

Sus mayores afloramientos están en la amplia plataforma del aeropuerto, en la base del cerro Acuchimay, y se observan claramente en los cortes de la avenida Mariscal Castilla, en los taludes de la vía evitamiento y cauce de la quebrada Ñahuinpuquio en su desembocadura en el río Alameda.

#### **4.- Diatomitas**

Afloran en las cercanías del fundo de Quicapata, abarcando una extensión aproximada de 1.3 km. de largo por 0.8 km. de ancho.

Litológicamente constituye una roca de color blanco, grano muy fino, bajo peso específico, compuesta esencialmente por sílice friable, suave al tacto y buena cohesión.

Se hallan sobre el volcánico Molinayoc y están cubiertas parcialmente por una delgada costra del volcánico Acuchimay.

#### **5.- Piroclásticos Terciarios – cuaternarios**

Pertencientes al volcánico Acuchimay, que están conformados por material que ha sido lanzado al aire para luego consolidarse a manera de bombas de color rojizo, acumulados cerca de la chimenea volcánica del cerro Acuchimay. Se caracterizan por ser de composición andesítica a basáltica, textura afanítica algo porosa y tener buena compactación.

Se hallan confinados a la cúpula y media ladera del cerro Acuchimay, llegando a cubrir parcialmente algunos sectores de la diatomita Quicapata.

#### **6.- Depósitos pleistocénicos**

Corresponden a acumulaciones de material que se dieron a principios de cuaternario, teniendo un origen esencialmente lacustre. Son de los siguientes tipos:

- a) Conglomerados de considerable espesor, acumulados por corrientes fluviales en una época de intensas precipitaciones, constituidos por fragmentos heterogéneos de forma angular a sub angular y tamaño variable de hasta 30 cm. de composición andesítica-riolítica, englobados en una matriz arenosa de grano medio a grueso.

Sus mayores exposiciones se dan en la parte media a baja de la ladera del cerro La Picota y de los cerros ubicados al este de Mollepata, mostrándose en toda su magnitud en los cortes de las quebradas que los bifurcan, tal es así que en algunas de ellas se le explota mediante canteras como material de construcción.

- b) Arenisca arcillosa y carbonatadas, que se ubican por encima de los conglomerados y se caracterizan por tener grano fino, color rosáceo, dispuestas en capas con rumbo promedio de N20°W y buzamiento de 10-15°NE. La secuencia de arenisca varía, por sectores de arcilla rojiza.

En su mayoría presentan buena compactación, sobre todo en horizontes donde se incrementa el contenido de carbonatos. En el corte de la quebrada Puracuti se puede observar espesores de hasta 40 metros.

Se exponen ampliamente en toda el área de Mollepata y en la peniplanicie donde se asienta la ciudad de Ayacucho.

## 7.- Depósitos recientes.

Constituyen los últimos transportes de materiales de una edad reciente y se caracterizan por su escasa cohesión y ausencia de litificación y cementación de sus componentes. Se dividen en los siguientes:

- a) **Coluviales**, que son acumulaciones de material detrítico que generalmente se ubican al pie de laderas de alta pendiente y también cubriendo en forma parcial, a manera de una delgada capa superficial, a la mayoría de rocas de la zona de estudio.

Está compuesto por material inconsolidado con bloques angulosos de diferente tamaño, en una matriz areno-limosa, acumulados principalmente por acción de la gravedad.

- b) **Aluviales y Fluviales**, que se refieren al material acarreado por torrentes de agua en un cauce definido o a lo largo de laderas inclinadas. Se hallan acumulados en el fondo de ríos y quebradas y también como producto del relleno de antiguas depresiones.

Están constituidos por arenas y gravas inconsolidadas con clastos subangulosos, de naturaleza mayormente volcánico.

Los principales lugares donde se exponen con espesores variables son, el centro de la ciudad de Ayacucho, el suelo de cimentación de las lagunas de estabilización de Totorilla, y en fondo de los ríos Alameda, Huatatas y quebradas subsecuentes.

## 5.4 Características geotécnicas de la ciudad de Ayacucho.

### 5.4.1 Exploración y muestreo de suelos y rocas

Las catástrofes recientes como el sismo de Moquegua (2001) han obligado al gobierno a desarrollar estudios de peligros para reducir los daños provocados por los terremotos. Estos estudios deben elaborarse basándose en el desarrollo del país o en la peligrosidad existente en él. En la actualidad, existe una gran cantidad de trabajos que tratan de evaluar los peligros sísmicos en zonas urbanas, auspiciados por organismos internacionales y gobiernos, con el fin de implementarlos de sus programas de protección civil, algunos de ellos se han desarrollado como recomendaciones.

Entre estos estudios existe uno realizado recientemente en la ciudad de Ayacucho, el cual ha sido realizado dentro del marco del proyecto INDECI-PNUD PER/02/051 Ciudades sostenibles; dirigida por el Ing. Erasmo Matos Espinoza, con la finalidad de establecer un documento técnico para el área de estudio, que presenta como producto final, la zonificación de peligros físicos asociados a la ocurrencia de diversos fenómenos naturales; fundamentalmente de origen geológicos, geológicos climáticos, geotécnicos y climáticos.

Nuestro trabajo de investigación en cuanto a la parte de geología y geotecnia se basa en dicho estudio, debido para dichas zonificaciones se realizaron recopilaciones de información existente que han permitido obtener características geomecánicas del suelo de cimentaciones hasta en una profundidad promedio de 3.0 m., en 176 puntos

específicos de investigación de suelos y 06 puntos de investigación de rocas dentro del área de estudio; los cuales se encuentran ubicados en forma dispersa en diversos barrios tal como se presenta en la lámina 06. Los puntos de investigación corresponden básicamente a “calicatas” y “puntos de muestreo de rocas” realizada por estudios anteriores; de los cuales se cuenta con información genérica sobre su ubicación, la cual se presenta en el anexo B: Geotecnia.

El programa complementario de exploración de suelos en dicho estudio. se ha desarrollado en base a 23 puntos de investigación de suelos mediante la apertura de “calicatas” y a 02 puntos de muestreo de roca, que se han ubicado en aquellas zonas en donde no se cuenta con información precisa recogida de estudios antecedentes. La ubicación de los puntos de investigación en base a “calicatas” y “puntos de muestreo de roca” realizados para dicho estudio se encuentra en la lámina 06.

En las “calicatas” aperturadas en dicho estudio y “puntos de muestreo de roca”, se ha efectuado la toma de muestras de los estratos que conforman el subsuelo. En los casos que los suelos sean de estructura básicamente granular, se ha extraído muestras alteradas del tipo  $M_{ab}$  y para el caso de suelos con cohesión de estructura fina se ha extraído muestras inalteradas del tipo  $M_{ib}$ .

#### 5.4.2 Clasificación de Suelos y Rocas

Como resultado de dicha investigación de campo y laboratorio, así como trabajos de gabinete con uso de la información topográfica disponible se ha desarrollado una zonificación de clasificación de suelos según SUCS y rocas para el área de estudio (proyecto INDECI-PNUD PER/02/051 Ciudades sostenibles); que se presenta en la lámina 08.

En término promedio el área de estudio, se encuentra asentada en suelos y/o rocas desde rígidos hasta medianamente compactos, provenientes de la alteración de los depósitos sedimentarios antiguos y recientes, volcánicos y aluviales de las formaciones terciarias Ayacucho, Molinayoc y cuaternarias recientes, respectivamente.

Los suelos predominantes en las pampas de Mollepata, Conchopata, Urbanización Jardín, Canaan y algunos sectores del casco urbano son del tipo ML (limo de baja plasticidad); en las laderas medias a bajas del cerro “la Picota” los suelos predominantes son del tipo GW-GM (grava areno limosa bien graduada) de origen sedimentario antiguo; en Yuracc Yuracc, Puca Cruz, Santa Ana y Andamarca los suelos predominantes son del tipo SM (Arena limosa); en el casco urbano concéntrico a la plaza de Armas de la ciudad y en el campo universitario de la UNSCH los suelos predominantes son del tipo GM (grava limosa) de origen sedimentario antiguo (lacustre) y reciente (Aluviales) que se han mezclado en forma errática o en donde los suelos aluviales cubren parcialmente a los suelos lacustres con una potencia no mayor a 3.0 m.; en la urbanización ENACE y barrios ubicados en la parte baja del cerro “La Picota” al norte de la ciudad los suelos predominantes son del tipo MH (Limo de alta plasticidad) y en las zonas que comprenden al Aeropuerto antiguo y nuevo se presentan rocas basálticas de estructura vacuolar envueltos en una matriz de limo y que tienen una cobertura de arena limosa no mayor a 1.0m.



En término el área del distrito de Carmen Alto, se encuentra asentada preferentemente en suelos y/o rocas desde rígidos hasta medianamente compactos, provenientes de la alteración de rocas de las formaciones terciarias Ayacucho, Molinayoc y Diatomitas Quicapata.

Los suelos predominantes en los alrededores del reservorio de agua cruda Quicapata son del tipo MH (Limo de alta plasticidad); en el campo de Tiro y alrededores próximos al embalse Quicapata y parte baja del cerro Campanayoc los suelos predominantes son del tipo ML ( limo de baja plasticidad) y en las zonas que comprenden la parte central del distrito como son Vista Alegre, Quicapata y Carmen Alto se presentan rocas basálticas de estructura vacuolar envueltas en limo y aglomerados volcánicos que tienen una cobertura de arena limosa no mayor a 1.0 m.; encontrándose superficialmente la roca en algunos sectores.

En términos promedio el área del distrito de San Juan Bautista, se encuentra asentada preferentemente en suelos desde rígidos hasta medianamente compactos provenientes de la alteración de los depósitos sedimentario antiguos, volcánicos y aluviales de las formaciones terciarias Ayacucho, Molinayoc, Acuchimay y cuaternarias recientes, respectivamente.

Los suelos predominantes en Santa Elena, cooperativa Las Américas, San Melchor y Barrio Miraflores son del tipo ML (limo de baja plasticidad); en las áreas de expansión urbanística del barrio Miraflores y hasta el límite extremo donde se ubica el botadero de la ciudad por la carretera hacia Cuzco los suelos predominantes son del tipo GM (grava limosa) de origen volcánico; en la media ladera que comprende la parte concéntrica al pico del cerro Acuchimay y San Juan se presenta aglomerados volcánicos expuestos superficialmente y en el mismo pico del cerro Acuchimay se presenta superficialmente rocas andesíticas a basálticas. En las zonas adyacentes a la margen derecha de la quebrada Chaquihuaycco se encuentran suelos de origen aluvial del tipo GW (grava arenosa bien graduada).

En término promedio el área del distrito de Jesús de Nazareno, se encuentra asentada preferentemente en suelos medianamente compactos, provenientes de la alteración de los depósitos sedimentarios antiguos, sedimentarios recientes y aluviales de las formaciones terciarias Ayacucho, y cuaternarias recientes, respectivamente.

Los suelos predominantes en la mayor parte del distrito son del GM (grava limosa) de origen sedimentario antiguo y en menor proporción son del tipo SM (arena limosa); las áreas circundantes al curso del río Alameda desde el barrio de San Sebastián hasta el denominado ovalo de evitamiento y la salida hacia Huanta, conforman una zona que se encuentra asentada sobre aglomerado volcánico.

La planta de tratamiento de aguas servidas de la ciudad de Ayacucho se encuentra emplazadas sobre suelos del tipo ML (limo arenoso) de origen aluvial y lacustre.

#### **5.4.3 Capacidad portante de los suelos.**

En el estudio realizado se desarrolló el cálculo de la capacidad portante de los suelos y rocas del área de estudio; con base a la información colectada anteriormente y el criterio ingenieril, común en este tipo de análisis.

El cálculo de la capacidad portante está basado en el conocimiento que se tiene de las propiedades geométricas de las unidades geológicas, suelos y rocas determinadas con base a la información antes descrita y en la interpolación realizada. Los cálculos se efectuaron utilizando las fórmulas de Meyerhof.

El cálculo de capacidad de carga admisible se efectuó para un determinado tipo de edificación urbana que corresponde a una casa habitación de hasta 03 niveles sobre un área total desde 160 m<sup>2</sup> a 200 m<sup>2</sup>; que resulta en las actuales condiciones de una edificación típica para el común de los pobladores del área urbana de la ciudad de Ayacucho.

Por la altura del edificio y las características geomecánicas típicas del suelo de cimentación de la ciudad de Ayacucho; se determina una profundidad de cimentación de 1.0 m. y dimensión mínima de 1.0 m. para el caso de zapatas cuadradas aisladas y de 0.4 m. a 0.6 m. para el caso de cimientos corridos; aunque en algunos casos por la presencia de roca que aflora en la superficie esta profundidad de cimentación puede adoptar hasta un valor mínimo de 0.6 m. y no menos.

Para el caso particular del suelo de cimentaciones de las laderas del cerro “La Picota” y el cerro “Acuchimay” se desarrolló el cálculo de la capacidad portante tomando en cuenta las inclinaciones críticas de las laderas del cerro. De los resultados se determinó que la incidencia de la alta inclinación de las laderas del cerro “La Picota” en la capacidad portante es importante por tratarse de un material granular en estado de compacidad: medio a compacto; a diferencia de la baja incidencia que se tiene por las inclinaciones medias del cerro “Acuchimay” por tratarse de un macizo rocoso de buenas condiciones geomecánicas.

Con los valores de capacidad portante obtenidos en cada punto de investigación y planteado adecuadamente en el plano topográfico base se ha desarrollado una zonificación de valores de capacidad portante; tomando en cuenta las formaciones geológicas existentes, la zonificación de suelos según SUCS y el criterio ingenieril en cuanto al trazado de curvas de iguales valores de capacidad portante. Ese estudio se efectuó para el caso de zapatas cuadradas aisladas cimentadas a una profundidad a una profundidad de 1.0 m. y con una carga máxima de 30 tn. Y cuyo resultado se present en la lámina 09.

De acuerdo a los resultados mostrados en la lámina 08 y lámina 09 se desprende en términos generales, lo siguiente:

- ❖ En aquellas zonas donde se presente predominantemente suelos de estructura fina provenientes de depósitos sedimentarios antiguos y las diatomitas Quicapata; tales como limos de alta a media plasticidad en un estado de compacidad que van desde el medio hasta el compacto los valores de capacidad portante se encuentran entre 1.0 kg/cm<sup>2</sup> a 1.5 kg/cm<sup>2</sup>.
- ❖ En aquellas zonas donde se presente predominantemente suelos de estruc granular provenientes de depósitos aluviales recientes; tales como gravas-areno-limosas en un estado de compacidad desde el medianamente suelto hasta el medio los valores de capacidad portante se encuentran entre 1.0 kg/cm<sup>2</sup> a 1.5 kg/cm<sup>2</sup>.

- ❖ En aquellas zonas donde se presente predominantemente suelos de estructura fina a granular provenientes de depósitos sedimentarios antiguos y recientes; tales como limos de baja plasticidad, limos-arenosos, limos-arcillosos, arenas-limosas y gravas-limosas en un estado de compacidad que van desde el medio hasta el compacto, los valores de capacidad portante se encuentran entre 1.5 kg/cm<sup>2</sup> a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>.
- ❖ En aquellas zonas donde se presente predominantemente suelos de estructura granular provenientes de depósitos sedimentarios antiguos y volcánicos-sedimentarios; tales como gravas-limosas en un estado de compacidad que van desde el medio hasta el compacto los valores de capacidad portante se encuentran entre 2.0 kg/cm<sup>2</sup> a 2.5 kg/cm<sup>2</sup>.
- ❖ En aquellas zonas donde se presente predominantemente en forma superficial o a profundidades no mayores a 1.0 m. rocas de origen volcánico como es el basalto envuelto en un matriz limosa, brechas y aglomerados volcánicos envueltos en un matriz areno-limosa en un estado de compacidad desde el muy compacto hasta el rígido los valores de capacidad portante son mayores a 2.5 kg/cm<sup>2</sup> y en la mayoría de las áreas superan ampliamente los 4.00 kg/cm<sup>2</sup>.

De los resultados se desprende que en términos promedios el valor de la capacidad portante de los suelos del área de estudios es mayor a 1.5 kg/cm<sup>2</sup>, llegando en algunas zonas de afloramiento volcánico a ser superior a 4.0 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 5.4.4 Zonificación geotécnica.

Con los resultados desarrollados en los ítems anteriores se elaboró la zonificación geotécnica para el área de estudio que comprende la presencia de hasta 10 tipos de suelos en función de sus características geotécnica; lo cual se presenta en la lámina 10 de acuerdo a la descripción siguiente:

**Suelo Tipo I:** Se trata de una roca del tipo aglomerado volcánico, andesítica Acuchimay y basalto de estructura vacuolar envuelta en una matriz de limo arenoso de baja plasticidad, ubicada sobre terrenos de pendiente desde muy suave a fuerte (0° a 60°) con muy buena capacidad portante (mayor a 4.0 kg/cm<sup>2</sup>), estable en laderas muy inclinadas, poco erosionable por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran mayormente en las áreas de los distritos de San Juan Bautista y carmen Alto. En el distrito de Ayacucho ocupan mayormente la planicie del aeropuerto antiguo y nuevo, y en menor proporción las escarpas de los ríos Alameda desde el denominado ovalo evitamiento hasta la salida hacia Huanta.

**Suelo Tipo II:** Se trata de una grava limosa formada por la mezcla de piedras angulosas de origen volcánico y limo-arenoso de baja plasticidad sobre terrenos de pendiente desde muy suave a suave (0° a 10°) con muy buena capacidad portante (2.00 kg/cm<sup>2</sup> a 2.5 kg/cm<sup>2</sup>), estable en laderas muy inclinadas, poco erosionable por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran mayormente en el distrito de San Juan Bautista en el barrio Miraflores y sus zonas de expansión urbanística.

**Suelo Tipo III:** Grava limo arenosa formada por la mezcla de piedras subredondeadas de origen sedimentario antiguo y reciente y limo arenosos de baja plasticidad sobre terrenos de pendiente muy suave (0° a 5°) con buena capacidad

portante ( $1.50 \text{ kg/cm}^2$  a  $2.00 \text{ kg/cm}^2$ ), poco estable en laderas muy inclinadas, media a alta erosionabilidad por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran mayormente en el distrito de Ayacucho en el casco urbano y zona norte y en el distrito de Jesús de Nazareno en su parte central.

**Suelo Tipo IV:** Limo inorgánico de baja a alta plasticidad de consistencia firme, estable ante cambios en el contenido de humedad de origen lacustrino muy consolidado sobre terrenos de pendiente desde muy suave a suave ( $0^\circ$  a  $10^\circ$ ) con regular a buena capacidad portante ( $1.00 \text{ kg/cm}^2$  a  $2.00 \text{ kg/cm}^2$ ), estable en laderas muy inclinadas, media erosionabilidad por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran mayormente en el distrito de Ayacucho en la Pampa de Mollepata, Urbanización ENACE, Conchopata, Urbanización Jardín y Cannan, en el distrito de San Juan Bautista en Cooperativa Ciudad de las Américas, Santa Elena, San Melchor y en el distrito de Carmen Alto en los alrededores de la parte sur de la Cantera de Diatomita Quicapata.

**Suelo Tipo V:** Arena limosa formada por alteración de tobas, de compacidad media a densa sobre terrenos de pendiente desde muy suave a media ( $0^\circ$  a  $15^\circ$ ) con buena capacidad portante ( $1.50 \text{ kg/cm}^2$  a  $2.00 \text{ kg/cm}^2$ ), estable en laderas muy inclinadas, media a alta erosionabilidad por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran mayormente en el distrito de Ayacucho en Barrios Altos, Yuracc Yuracc, Puca Cruz, Santa Ana y Andamarca, y en el distrito de Jesús de Nazareno en la parte sur limitrofe con el río Alameda.

**Suelo Tipo VI:** Limo inorgánico de baja plasticidad de consistencia firme formada por alteración de tobas sobre terrenos de pendiente moderada ( $15^\circ$  a  $30^\circ$ ), con regular a buena capacidad portante ( $1.00 \text{ kg/cm}^2$  a  $1.50 \text{ kg/cm}^2$ ), estable en laderas muy inclinadas, media erosionabilidad por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran mayormente a lo largo del valle del río Alameda entre el denominado ovalo evitamiento hasta la ubicación de la planta de tratamiento de aguas servidas.

**Suelo Tipo VII:** Grava areno limosa bien graduada de origen aluvial y/o fluvial, de compacidad suelta a media sobre terrenos de pendiente muy suave ( $0^\circ$  a  $5^\circ$ ) con regular capacidad portante ( $1.00 \text{ kg/cm}^2$  a  $1.50 \text{ kg/cm}^2$ ), inestable en laderas muy inclinadas, alta erosionabilidad por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran mayormente a lo largo del cauce y áreas adyacentes del río Alameda entre el denominado ovalo evitamiento hasta la ubicación de la planta de tratamiento de agua servidas de Ayacucho, y en el cauce y áreas adyacentes de la quebrada Chaquihuaycco, desde su parte alta hasta su ingreso a la Cooperativa Ciudad de las Américas en el distrito de San Juan Bautista.

**Suelo Tipo VIII:** Grava areno limosa bien graduada de origen sedimentario antiguo (conglomerado pleistocénico) de compacidad media a densa, sobre terrenos de pendiente moderada ( $15^\circ$  a  $30^\circ$ ) con regular capacidad portante ( $1.00 \text{ kg/cm}^2$  a  $1.50 \text{ kg/cm}^2$ ), inestable en laderas muy inclinadas, alta erosionabilidad por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran mayormente en el distrito de Ayacucho a lo largo de las laderas medias a altas del cerro "La Picota" desde el extremo norte cerca de la Urbanización Enace hasta el extremo sur cerca al Barrio Santa Ana.

**Suelo Tipo IX:** Limo inorgánico de alta plasticidad, baja densidad y peso específico, susceptible a cambios de volumen en el contenido de humedad, media compresibilidad, emplazado sobre la Cantera de Diatomita Quicapata de pendiente muy suave ( $0^\circ$  a  $10^\circ$ ) con baja capacidad portante ( $1.00 \text{ kg/cm}^2$ ), inestable en laderas muy inclinadas, alta erosionabilidad y variación de volumen por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran únicamente en el área de emplazamiento de la Cantera de Diatomita Quicapata ubicada en la zona Sur del distrito de Carmen Alto.

**Suelo Tipo X:** Limo inorgánico de baja plasticidad de origen sedimentario reciente, sobre terrenos de pendiente muy suave ( $0^\circ$  a  $5^\circ$ ) con regular capacidad portante ( $1.00 \text{ kg/cm}^2$  a  $1.50 \text{ kg/cm}^2$ ), inestable en laderas muy inclinadas, alta erosionabilidad por acción hídrica, no agresivo al concreto. Estos suelos se encuentran únicamente en el área de emplazamiento de la planta de Tratamiento de aguas servidas de la ciudad de Ayacucho en el distrito de Jesús de Nazareno.

En todos los tipos de suelos antes descritos, a excepción de aquellos que se ubican en cursos de aguas claramente definidos, no se ha detectado la presencia de nivel freático; el cual, se ha de encontrar lo suficientemente profundo como para incidir negativamente en las propiedades geomecánicas de los suelos y ocasionar pérdidas de resistencia mecánica por el efecto de lixiviación.

## 5.5 Características dinámicas de la ciudad de Ayacucho

### 5.5.1 Introducción

Para evaluar las características dinámicas del terreno en la ciudad de Ayacucho; adicionales a los estudios geológicos y geotécnicos recopilados; se realizaron estudios geofísicos tales como microtrepidaciones, refracción sísmica y un análisis de amplificación sísmica.

Se presentará un informe del trabajo de mediciones de microtrepidaciones desarrollados en 51 puntos distribuidos en el área de estudio, describiéndose el equipo y la metodología empleada para la toma de datos y su respectivo análisis. Los resultados se resumen en un plano zonificación de periodos de la zona estudiada.

Por otra parte el ensayo de refracción sísmica es una herramienta básica para explorar en forma rápida y económica grandes áreas, permitiendo obtener con relativa precisión los espesores de los estratos y las velocidades de ondas P. Este método nos permitirá representar el perfil del subsuelo con resolución vertical relativamente cruda, ya que no es posible diferenciar capas delgadas.

Debe tenerse presente que por más avances que se logre en estas técnicas auxiliares de la geotecnia, los métodos geofísicos "NO SUSTITUIRAN EN EL FUTURO" a las perforaciones, ni menos a la toma de muestras; por el contrario se complementan y permiten conducir a una mejor información del subsuelo.

Complementado a los trabajos geofísicos, se aplicará la teoría de propagación unidimensional de las ondas de corte en depósitos de suelo (amplificación sísmica), primero bajo niveles mínimos de deformación y luego utilizando señales sísmicas de movimiento fuerte como fuerza de excitación.



Se propone determinar con este método el comportamiento dinámico de los suelos y compararlos con los estudios geofísicos realizados.

El fin de este capítulo es el de realizar la zonificación geotécnica sísmica del área de estudio, teniendo como base los estudios geológicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos, así como la revisión de estudios particulares de mecánica de suelos recopilados para la investigación. El área de influencia del presente estudio es el ámbito urbano de la ciudad de Ayacucho (Barrio de la Magdalena, Distrito de Jesús de Nazarenas, Enace, parte del centro histórico, Barrio de los Artesanos y otros mostrados en las láminas).

### 5.5.2 Medición de Microtrepidaciones en la ciudad de Ayacucho.

Normalmente, el suelo siempre se encuentra vibrando con amplitudes del orden de unas micras o micrones ( $10^{-6}$  m). Estas vibraciones se han clasificado en dos tipos, a saber, las que tienen componentes del período en un valor menor de 1 seg, las cuales se les llaman "microtrepidaciones" y aquellas que contienen grandes períodos, a las cuales se les llaman "microsismos". Estas microtrepidaciones congregan vibraciones que vienen propagándose en todas direcciones; vibraciones que son producidas por causas naturales o por medios artificiales (máquinas industriales). Usualmente, las amplitudes de tales vibraciones están en el orden de 0.05 - 10 micrones, los períodos son de unos 0.05 - 1 seg y las aceleraciones son de  $10^{-2}$  -  $10^{-1}$  gals.

Según el Dr. Kiyoshi Kanai (considerado como el padre de las microtrepidaciones), lo que ha logrado llamar la atención hacia estas diminutas vibraciones ha sido la existencia de una íntima relación entre éstas y las características del suelo, tanto desde el punto de vista teórico como práctico.

Cuando se comenzó a usar las microtrepidaciones, en un principio las computadoras no estaban tan difundidas como las son en la actualidad, y por esta razón se utilizó como recurso paliativo la curva de distribución de períodos. Con el progreso de las computadoras, se ha logrado realizar el cálculo a través de diversos espectros, siendo los más comúnmente usados, los espectros de Fourier y los espectros de potencia. La longitud del registro que se utiliza en el análisis queda fijada en relación con la regularidad de las vibraciones pero, habitualmente dentro de un registro de unos 5 a 6 minutos se puede encontrar un tramo de unos 40 segundos que evidencie perturbaciones mínimas de los medios de transporte, fábricas, etc. En el análisis de este tramo, es necesario una discretización o conversión de los datos analógicos a digital, aplicándose un intervalo de muestreo de 0.01 ó 0.02 seg. Pero por otra parte, en contraste con su transformada rápida, no siempre se hace evidente la naturaleza de la microtrepidación, debiéndose tener cuidado en los casos en que no se cumpla ese rol eficiente para la que fue creada.

Actualmente se sabe que el período predominante del suelo determinado por la medición de microtrepidaciones tiene una gran correlación con los efectos de sitio, cuando la respuesta dinámica del terreno durante movimientos severos no es exactamente predicha por el análisis de las microtrepidaciones. Esta técnica de medición de microtrepidaciones ha sido utilizada en el presente estudio para determinar las características dinámicas del terreno de fundación en la ciudad de Ayacucho.

### 5.5.2.1 Descripción del equipo

Existen una serie de equipos de medición de microtrepidaciones, los cuales esencialmente cuentan con los mismos componentes, variando frecuentemente en los dispositivos de almacenamiento, visualización y procesamiento de los datos. El laboratorio geotécnico del CISMID posee un moderno sistema de adquisición de datos de prospección sísmica, GEODAS 10, el cual tiene las siguientes características:

- 16 canales de entrada, cada uno con un convertidor A/D individual con resolución 24bit y alta velocidad de muestreo.
- Computadora portátil, Toshiba SS-3480, CPU Pentium III 600MHz. RAM 64MB y Disco Duro de 12GB.
- 5 Sensores triaxiales "GEODAS-10, CR4, 5-1" de 1 segundo de periodo natural.
- Cable conectores de 50m de longitud
- Batería de 12V.

El sistema permite visualizar y registrar las vibraciones ambientales a diferentes frecuencias de muestreo. Una vez que las ondas hayan sido grabadas en el disco duro de la computadora, éstas pueden ser procesadas inmediatamente, mediante un software incorporado que permite determinar los espectros de fourier, las relaciones espectrales H/V y las relaciones espectrales entre dos registros de diferentes lugares.

Mediante este procesamiento rápido se puede evaluar en campo la calidad de las mediciones, en función a lo cual se podrá determinar si se debe realizar mediciones adicionales.

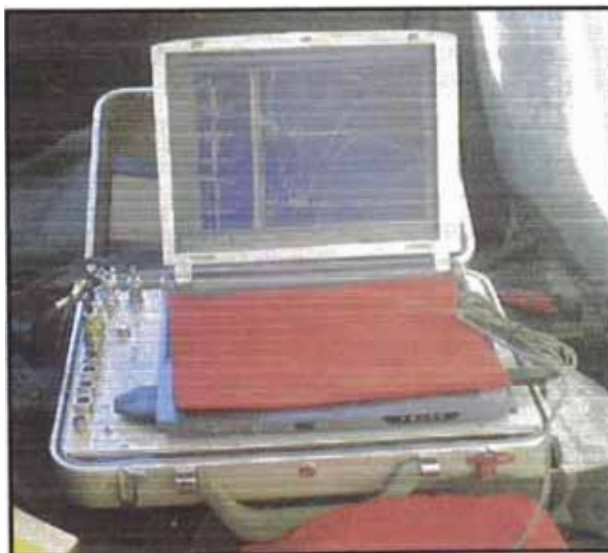


Figura 5.6 Computadora portátil

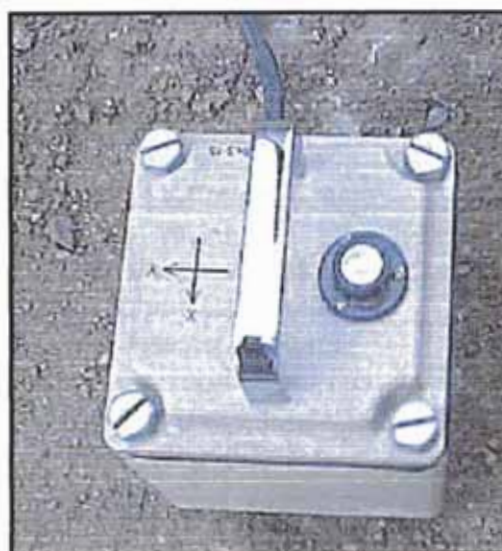


Figura 5.7 Sensores triaxiales

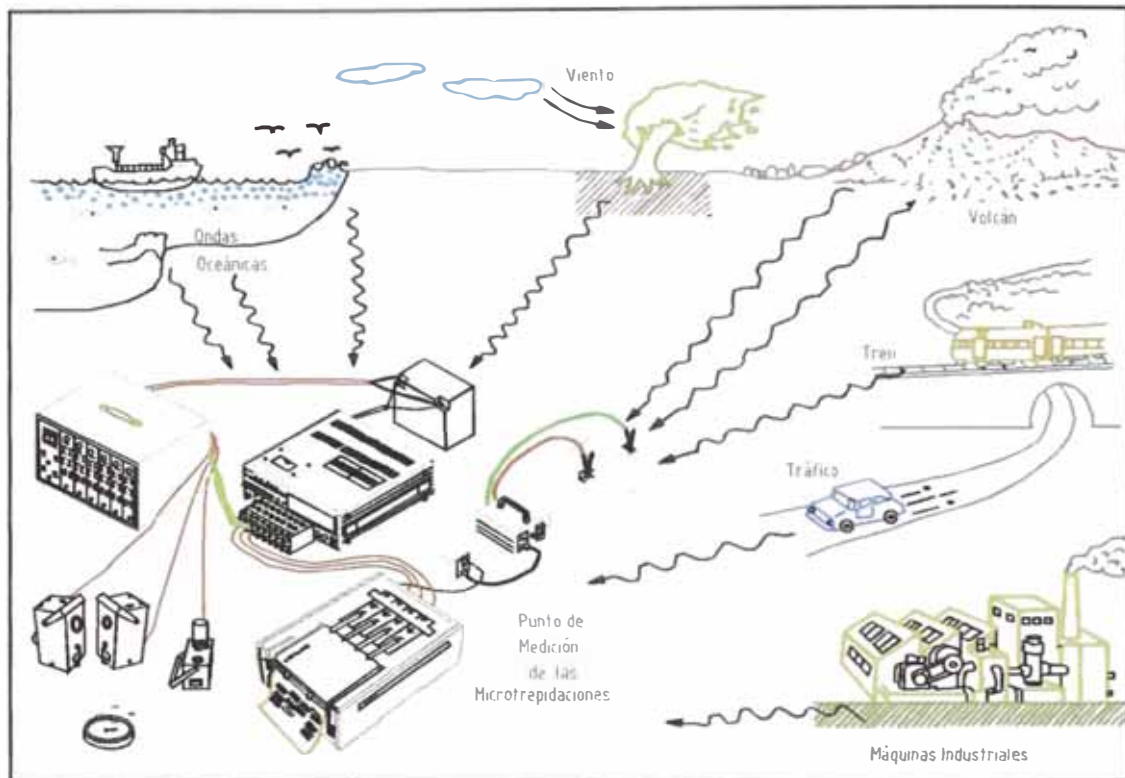


Figura 3.8 Fuentes originarias de las ondas de microtrepidaciones

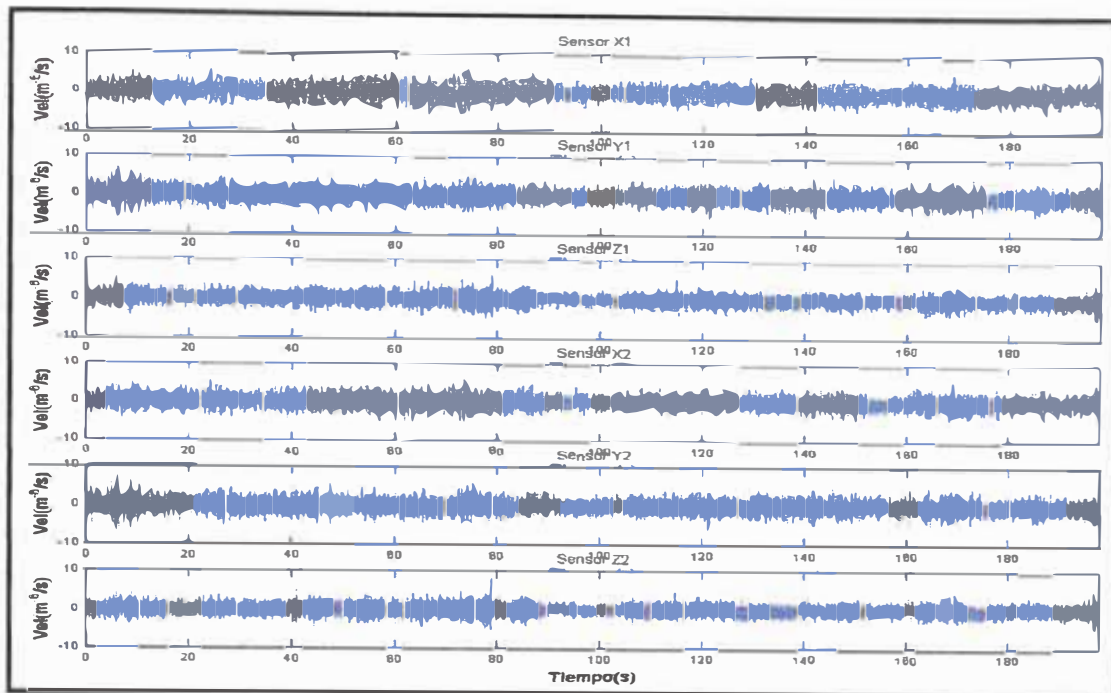
### 5.5.2.2 Procedimiento del ensayo

Las mediciones de microtrepidaciones son realizadas sobre la superficie del terreno o a diferentes profundidades dentro de una perforación, utilizando sensores suficientemente sensibles. Estas mediciones registran las velocidades de las microtrepidaciones, las que luego son almacenadas en forma digital, para su posterior procesamiento en gabinete. Para realizar la medición se instala el sensor triaxial en la superficie del terreno, orientando sus componentes horizontales en las direcciones E-W y N-S. Luego de conectar e instalar todo el equipo se procede a registrar las microtrepidaciones por un lapso de tiempo lo suficientemente largo para garantizar que se registren tramos de ondas sin interferencias directas por el paso de vehículos o personas en las zonas próximas al sensor.

En la ciudad de Ayacucho se realizó la medición de microtrepidaciones en 50 puntos distribuidos uniformemente en toda el área de estudio. La localización de estos puntos se presenta en la lámina 11. Los registros de las microtrepidaciones obtenidos en los puntos representativos de cada zona se presentan en el Anexo C.

### 5.5.2.3 Evaluación e interpretación de las mediciones.

Usualmente la interpretación de los registros de microtrepidaciones se realiza través del análisis de amplitudes espectrales. Este procedimiento consiste en convertir la señal analógica a una señal digital discreta, para luego aplicarle la transformada de fourier y obtener el periodo predominante, el cual presenta la mayor amplitud espectral.



Ejemplo de un registro de velocidades de dos sensores triaxiales del punto de microtrepidaciones M1 realizado en la ciudad de Ayacucho

Para eliminar el efecto de la fuente de generación de las vibraciones, Nakamura (1989) propone evaluar la relación espectral H/V, la cual representa mejor el comportamiento dinámico del perfil del terreno. En el presente estudio, dado que el equipo GEODAS 10 está implementado con un software de procesamiento de datos que incluye ambos procedimientos, se ha realizado el análisis utilizando estas dos metodologías para el procesamiento de las señales, encontrándose que la relación espectral H/V propuesta por Nakamura define con mayor claridad el periodo de vibración fundamental del terreno. Los gráficos de las relaciones espectrales H/V de los puntos seleccionados para cada zona se presentan en el Anexo C, conjuntamente con un segmento de onda correspondiente.

#### 5.5.2.4 Zonificación de períodos según las microtrepidaciones

La zonificación de períodos del área urbana fueron definidas en función a los resultados de períodos predominantes obtenidos en 50 puntos de medición de microtrepidaciones que cubren los diferentes tipos de suelos, tal como se puede observar en la lámina 12.

La tendencia general de estos estudios de microtrepidaciones es la de elaborar planos con curvas isoperíodos, estas curvas son trazadas interpolando los puntos con valores conocidos de períodos predominantes; para este estudio se realizó una zonificación de períodos en lugar de las curvas isoperíodos, puesto que al generar dichas curvas el rango de períodos eran muy pequeños, haciendo su observación e interpretación dificultosa.

Se clasificó el área en estudio en 4 zonas, agrupadas en función a los valores de período; presentándose a continuación la descripción de cada una de ellas, así como su delimitación:



**Zona 1.-** Corresponde a períodos comprendidos entre 0.06 y 0.1 seg., característica de suelo rígidos, lo cual es corroborado por los planos de geología. De esta lámina se desprende las siguientes observaciones:

Se observa una franja paralela a la carretera vía libertadores con un período promedio de 0.07 seg. debido a materiales conglomeráticos muy compactos, observándose en la parte norte de la asociación Los Artesanos bolonerías y afloramientos de dicho material. también abría que ver que dichos materiales se encuentran en una pendiente relativamente fuerte para lo cual se tendría que realizar un estudio de estabilidad de taludes.

En las zonas de Enace, Sector Público, La parte noroeste de la Urbanización Mariscal Cáceres, Asociación María Parado de Bellido, Asociación 16 de abril y Sector de Educación se observa períodos promedio de 0.09 seg. debido a depósitos lacustres y aluviales, muy compactos. Según se pudo observar en trabajo de campo esta zona tiene una predominancia de un material llamado caliche.

En las zonas correspondientes a la Urbanización Simón Bolívar, parte de la Magdalena, Asociación Los Rosales y toda franja que limita con la Vía de Evitamiento se pudo observar períodos de 0.08 seg. como promedio; esto debido a que dichas zonas se encuentran en materiales volcánicos, y también encontrándose en la zona norte del Barrio de la Magdalena el material caliche.

**Zona 2.-** Se observa dos áreas con períodos predominantes con poca variación, encontrándose entre 0.1 y 0.2 seg. los cuales corresponden al tipo de material lacustre, así como depósitos fluviales y aluviales muy compactos.

En la primera se observa una franja correspondiente a la asociación Cerrito la Libertad, parte de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, parte del estadio Ciudad de Cumana, Urbanización las Nazarenas; También se encontró material caliche en algunas zonas como los alrededores del estadio y en el resto de la zona el material lacustre muy compacto.

En la segunda corresponde a barrios que conforman los alrededores del centro histórico de la ciudad, tales como parte de la Magdalena y el Barrio Calvario; en esta zona se puede observar depósitos fluviales y aluviales producto de los materiales transportados, de naturaleza volcánica. También se encontró material caliche por algunos sectores, observándose que este material solo se encuentra en la superficie.

**Zona 3.-** Se observa dos áreas con períodos predominantes, encontrándose entre 0.2 y 0.3 seg. los cuales corresponden al tipo de material lacustre, así como depósitos fluviales y aluviales muy compactos.

La primera se encuentra ubicada en casi su totalidad de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, parte de asociación el Arco, Villa San Cristóbal, Urbanización Ingeniería, Asociación San Carlos y su totalidad del estadio Leoncio Prado; observándose que por Villa San Cristóbal existe afloramiento de material compacto así como grandes pendientes los cuales requerirán un estudio adicional de estabilidad de taludes; en el resto de la zona se ubica depósitos lacustres.



La segunda corresponde al centro histórico de la ciudad; en esta zona se puede observar depósitos fluviales y aluviales producto de los materiales transportados de los cerros aledaños, especialmente del cerro de la picota. Se encontró material relativamente suelto, observándose que este material solo se encuentra en la superficie.

Más adelante se hará un estudio unidimensional de la amplificación sísmica utilizando los perfiles obtenidos de la refracción sísmica.

### 5.5.3 Ensayos de refracción sísmica

Los estudios geológicos no brindan la información necesaria de la sección estratigráfica y su profundidad, es allí que con el objeto de estimar los límites entre los estratos existentes (potencia), se realizaron los ensayos de refracción sísmica.

La exploración geofísica fue ejecutada con el objeto de determinar la velocidad de ondas P y la potencia de los estratos existentes en el área de estudio. La información obtenida será de gran utilidad para determinar una estimación indirecta de las características estratigráficas que se encuentran a diferentes profundidades.

Las ondas P o longitudinales (ver Figura 5.9) tienen la ventaja de que son las que se propagan con mayor velocidad siendo, por lo tanto, las de mayor interés cuando se utilizan métodos que, como el de la refracción sísmica, están basados en la obtención de las primeras llegadas de las ondas a los sensores.

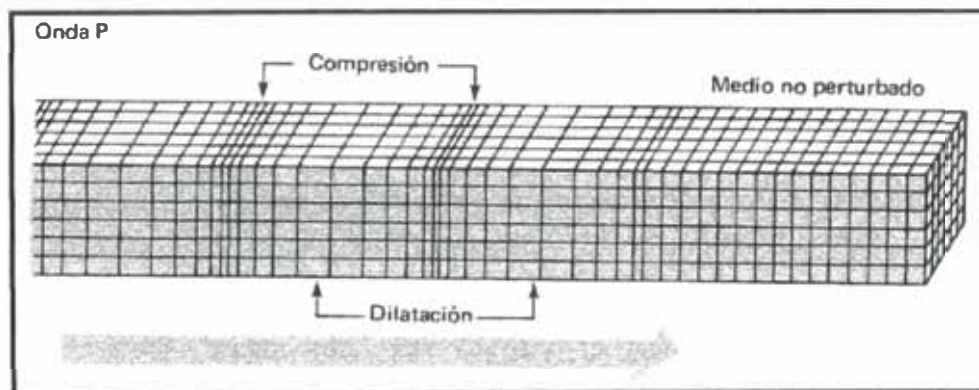


Figura 5.9: Onda Longitudinal

La Figura 5.10 muestra, para un modelo bicapa, las posiciones sucesivas del frente de ondas longitudinales generado mediante impacto o explosión en la superficie del terreno cuando la velocidad de propagación es mayor en el estrato inferior que en el superior. El rayo directo viaja horizontalmente por la parte superior de la primera capa a una velocidad  $V_1$  y el rayo refractado sigue la trayectoria AB CD definida por el ángulo de refracción crítica  $q_c = \arcsin V_1/V_2$ . De esta fórmula se desprende que es necesario que sea  $V_2 > V_1$  para que exista dicho ángulo, se pueda producir el fenómeno de refracción crítica y las primeras llegadas detectadas en la superficie del terreno contengan información sobre las características y profundidad a las que se encuentra el segundo estrato. Esta es una de las mayores limitaciones que presenta esta técnica a la hora de caracterizar un sistema multicapa, pues exige que aumente continuamente la rigidez de los estratos con la profundidad. No obstante, en muchos casos en los que se trata de determinar el espesor de zonas alteradas de un macizo rocoso o la profundidad a la que se encuentra la roca por debajo de un relleno cuaternario, puede constituir la técnica ideal para ser utilizada. También puede

proporcionar óptimos resultados a la hora de determinar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático en el terreno ya que dicho nivel constituye un refractor muy característico con velocidad de propagación de 1500 m/s (velocidad de propagación del sonido en el agua). En tales casos, el grado de error en la estimación de profundidades puede llegar a ser incluso inferior al 10% de los realmente existentes.

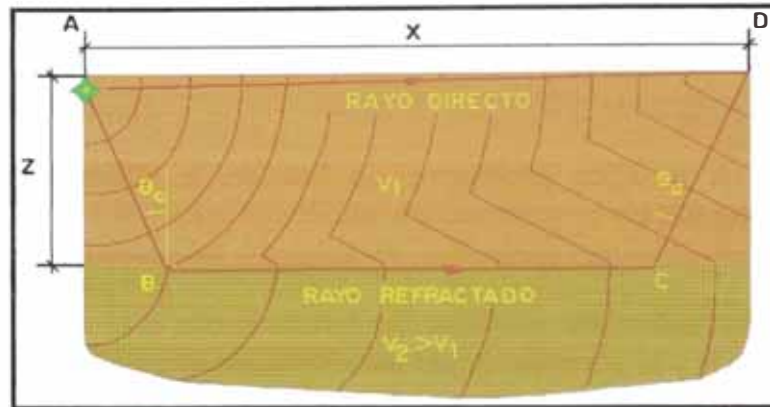


Figura 5.10: Ángulo crítico de refracción

El ensayo de refracción sísmica en generada por fuentes de energía impulsiva a puntos localizados a varias distancias a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno. La fuente de energía es generalmente una carga pequeña de explosivo o un golpe de martillo. La energía es detectada, amplificada y registrada de tal manera que puede determinarse su tiempo de arribo en cada punto. El instante del impacto de la explosión, denominado "tiempo cero", es registrado conjuntamente con las vibraciones del suelo que arriban a los detectores (geófonos). Por lo tanto, los datos consisten en tiempos de viaje y distancias, siendo el tiempo de viaje el intervalo entre el tiempo cero y el instante en que el detector empieza a responder a la perturbación. En este método la profundidad de investigación ( $h$ ) es directamente proporcional a la línea extendida ( $L$ ) en el terreno, con una relación de  $1/3$ .

En la Figura 5.11 se presentan los resultados obtenidos por el laboratorio de geotecnia al aplicar el método del "plus-minus" para interpretar dos perfiles yuxtapuestos de refracción sísmica realizados mediante extendimientos de 12 geófonos separados 5 m entre sí.

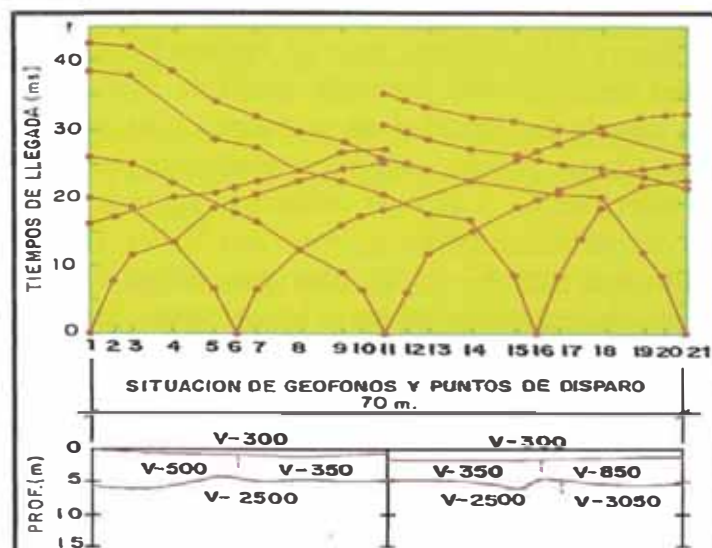


Figura 5.11: Perfil de velocidades

Además de proporcionar información sobre la naturaleza del sustrato rocoso y sus cambios laterales, la refracción sísmica permite estimar aproximadamente el módulo de elasticidad de las formaciones investigadas, el grado de fracturación de la roca y su ripabilidad.

Según la teoría de elasticidad, el módulo de Young dinámico,  $E$ , viene dado en función de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales,  $V_p$ , y del coeficiente de Poisson  $\nu$  por la siguiente fórmula:

$$E = V_p^2 \rho [(1 + \nu)(1 - 2\nu)] / (1 - \nu)$$

siendo  $\rho$  la densidad del material.

### 5.5.3.1 Descripción del equipo

El laboratorio geotécnico del CISMID posee un equipo de prospección sísmica para realizar el ensayo de refracción sísmica GEODA-10, desarrollado por la empresa TOKIO SOIL RESEARCH Co. Ltd., el cual tiene las siguientes características:

- 16 canales de entrada, cada uno tiene un convertidor A/D individual con resolución 24 bits y de alta velocidad de muestreo. Sensores de 10 hz. de frecuencia, los cuales permiten registrar las vibraciones ambientales del terreno producidas por fuentes naturales o artificiales y arribo de las ondas P y S.
- Computadora portátil, PC Toshiba SS-3480 PA – DS60P1N8M, CPU Pentium III 600 MHz. RAM 64MB. Disco duro 12 GB.
- Longitud del cable conector de geófonos 180 metros.

Los registros de las ondas sísmicas obtenidas con el equipo GEODAS-10 en cada una de las líneas de exploración se procesan en el campo (preliminar) como en el gabinete (definitivo) utilizando para ello programas de cómputo para el procesamiento e interpretación.



Figura 5.12: plato metálico y comba



Figura 5.13: geófonos



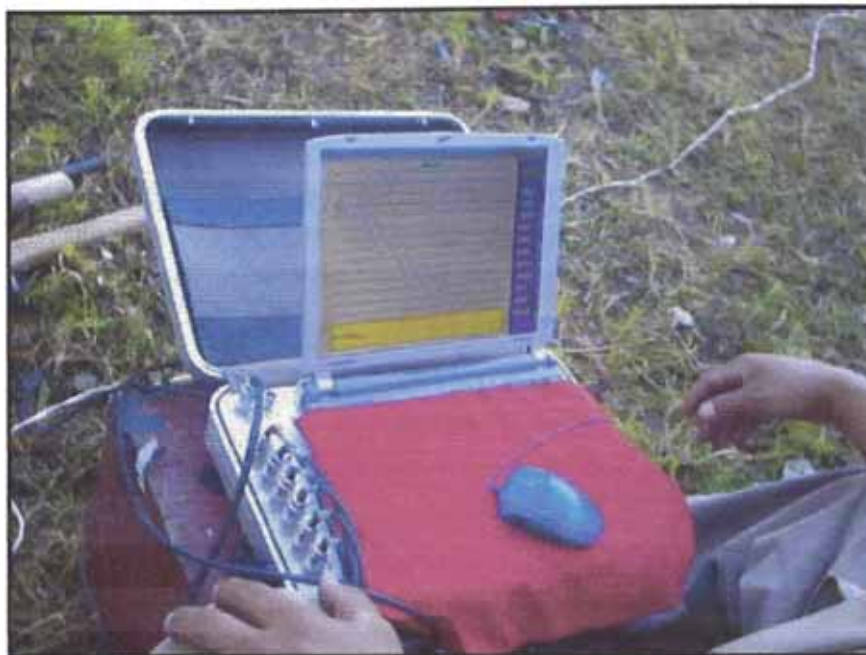


Figura 5.14: Computadora portátil, PC Toshiba SS-3480 PA

El software utilizado es Seismic Exploration (GEODAS-10): Permite visualizar en tiempo real y grabar el registro de las mediciones en forma digital. Permite leer los registros de campo, visualizar en pantalla e imprimir los registros.

El SIPx de Rim Rock programa de procesamiento e interpretación de ensayos d refracción sísmica. Este programa permite analizar rápidamente y con precisión dato del ensayo de refracción sísmica de la siguiente manera:

- Leyendo los datos del sismógrafo GEODAS-10.
- Desplegando las formas de onda de los registros de llegada en la pantalla.
- Ingresando y revisando los datos con un guía gradual de sugerencia e pantalla.
- Interpretando los registros de llegada y geometría de superficie para producir un perfil a profundidad de las capas del terreno.

### 5.5.3.2 Procedimiento de los trabajos de campo

Luego de la definición de los trazos de las líneas sísmicas, se procede a instalar los geófonos y los cables de conexión al equipo de adquisición de datos. El espaciamiento entre geófonos es definido en función de la profundidad a explorar. Posteriormente se realiza el levantamiento topográfico de las líneas y se procede a generar las señales sísmicas.

La fuente de energía utilizada para generar las ondas sísmicas fue en este caso un comba de 25 lb. Se realizaron en total de 22 líneas cuyas longitudes fueron de 80 metros cada línea, con espaciamientos entre cada geófono de 5 metros. La ubicación de las líneas sísmicas, se presenta en la lámina 11.

Los registros de las ondas sísmicas obtenidas en cada una de las líneas d exploración realizadas, las curvas tiempo distancia (domográficas), conjuntamente

con los tiempos de llegada se presentan en el anexo D. Con esta información se realizó la interpretación de los perfiles sísmicos del área investigada.

### 5.5.3.3 Evaluación e interpretación de los trabajos

Dado que la profundidad de la exploración está directamente relacionada con la longitud de la línea, se realizaron los ensayos con la longitud de 80 metros con la cual se logró explorar profundidades de 25 a 30 metros.

Si bien con esta geometría de las líneas sísmicas se pueden estimar estratos promedios a grandes profundidades, esta no nos permite determinar una estratigrafía detallada del material superficial.

Este estudio es un análisis preliminar indirecto con el cual se determina la potencia de los estratos y profundidades, teniendo estas un grado de aproximación aceptable, sin embargo requieren de algunas verificaciones mediante perforaciones para determinar su grado de precisión. En este trabajo los ensayos de refracción sísmica complementados con las calicatas obtenidas de trabajos anteriores proporcionaron información directa, útil para determinar una estimación cuantitativa de las características geológicas.

La evaluación del riesgo sísmico no consiste solamente en estudios geológicos, geotécnicos y evaluaciones estructurales sino que también debe estar complementado con el comportamiento dinámico de los suelos, para ello se realizaron estudios de microtrepidaciones y refracción sísmica; que haciendo uso de los perfiles estratigráficos y valores dinámicos obtenidos nos proporcionarán mediante un procedimiento unidimensional (SHAKE) la amplificación sísmica del área de estudio.

### 5.5.4 Aplicación de la teoría de amplificación dinámica

Actualmente, la mayoría de los ingenieros sísmicos están de acuerdo con la idea que las características del sacudimiento sísmico en un sitio dado, en un evento particular, dependerá de muchos factores, incluyendo los siguientes:

- El mecanismo fuente del sismo.
- La magnitud del sismo.
- La distancia del lugar a la zona principal de liberación de energía.
- Las características geológicas de las formaciones rocosas a través de las cuales las ondas sísmicas deben viajar desde la fuente hasta el área general de interés.
- Las condiciones locales del suelo subyacente al sitio en particular.
- Los posibles efectos de superposición.

Las ondas una vez alcanzada el área de la ciudad, serán modificadas conforme viajen desde las formaciones rocosas a través de los diferentes depósitos del suelo (variantes en tipo y profundidad), de tal forma que al alcanzar la superficie del suelo tendrán características diferentes en distintos lugares de la ciudad, por lo tanto, también se esperará que el daño sísmico varíe significativamente.



En años recientes esto ha sido muy notorio por el registro simultáneo de movimiento sísmico en diferentes lugares de grandes ciudades, de tal forma que se ha obtenido una clara evidencia para demostrar estos efectos.

Aunque en algunos casos los datos no han sido cuantitativamente establecidos los numerosos casos de relaciones entre los niveles de daño a las construcciones y la profundidad de los depósitos provee un patrón bastante consistente que tiene las siguientes características:

1. Para estructuras bajas, de período relativamente corto se produce máximo daño e intensidad del movimiento sobre depósitos superficiales (de período corto) y mínima intensidad de daño sobre depósitos de suelo profundos (período largo).
11. Para estructuras altas, de período largo, se produce máximo daño e intensidad del sacudimiento sobre depósitos profundos (período largo) y mínimo daño sobre depósitos superficiales (período corto).

Este patrón general sugiere que la intensidad del daño estructural está relacionado entre otros factores: el período natural de la estructura y el período del depósito del suelo subyacente. Cuando estos períodos son similares, un tipo de efecto de resonancia puede desarrollarse y la respuesta de la edificación puede ser muy alta; cuando estos períodos son muy diferentes no se espera fuerte interacción entre el suelo y la estructura, y la respuesta estructural es relativamente baja.

De las diferentes características de los movimientos sísmicos, ninguna está tan influenciada por las condiciones del suelo, como la forma del espectro de respuesta.

Estudios realizados anteriormente sugiere que los depósitos de suelo blandos y profundos introducen una mayor proporción de componentes de periodos largos en los movimientos de la superficie; los efectos aparentemente se incrementan conforme la profundidad o blandura crece.

El estudio tiene como objetivo aplicar la teoría de propagación unidimensional de las ondas de corte en depósitos de suelo, utilizando señales sísmicas de movimientos fuertes como fuerzas de excitación.

A continuación se modelarán los perfiles de suelo de la zona de estudio encontrados en los ensayos de refracción sísmica, sometiéndole al cómputo de los espectros de respuesta de estos suelos, bajo tres sismos de entrada registrados, utilizando el programa SHAKE.

Los resultados del análisis tienen particular relevancia por que nos proporcionarán sus espectros de respuesta reales para los tipos de suelos de la ciudad de Ayacucho.

#### **5.5.4.1 Métodos de la evaluación**

Varios métodos para evaluar el efecto de las condiciones locales del suelo sobre la respuesta del terreno durante los sismos están disponibles en la actualidad. La mayor parte de estos métodos se basan en la suposición que las principales respuestas en un depósito de suelo son causadas por la propagación vertical de las ondas de corte proveniente de la formación rocosa subyacente.

Procedimientos analíticos basados en este concepto, que incorporan un comportamiento no lineal del suelo, han dado resultados en buena concordancia con las observaciones de campo en cierto número de casos. De allí que estos métodos están logrando incrementar su uso en la ingeniería sísmica para predecir la respuesta en depósitos de suelos y las características de los movimientos en la superficie del terreno.

El procedimiento analítico involucra los siguientes pasos:

- Determinar las características de los movimientos probables ha desarrollar en la formación rocosa subyacente del sitio y seleccionar un acelerograma con estas características para el análisis.
- Determinar las propiedades dinámicas del suelo. Relación promedio entre el módulo dinámico del corte y la fracción de amortiguamiento de los suelos, como funciones de la deformación por corte y las propiedades estáticas.
- Calcular la respuesta del depósito del suelo al movimiento de la roca base.

A demás con el objeto de modelar la amplificación sísmica teniendo como información disponible la medición de microtrepidaciones dentro del entorno SIG se utilizó el método de Nakamura como una información referencial. Esta información permite obtener los períodos de vibración natural del terreno, así como también mediante las relaciones espectrales H/V, estimar las respuestas del perfil del suelo probables, conocida también como función de transferencia, a partir por la cual se puede estimar el valor de amplificación sísmica correspondiente.

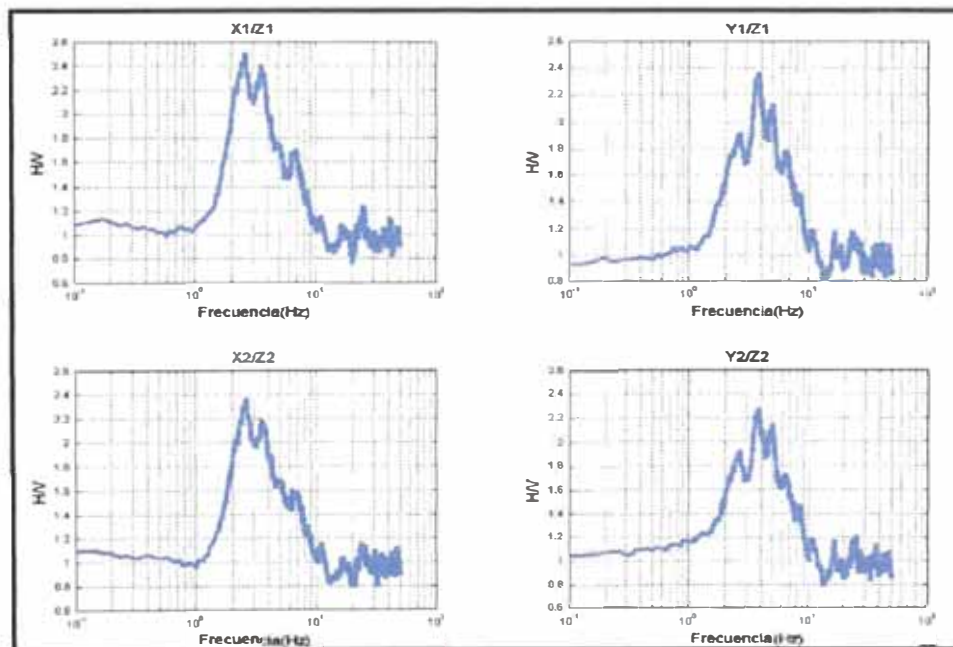


Figura 5.15a: Relación H/V de las mediciones de microtrepidaciones

Sin embargo, investigaciones teóricas y experimentales (Lachet y Bard, 1994) han demostrado que el método únicamente permite la determinación del período predominante. Pero tal vez la mayor limitación del método H/V, es que presenta vacíos teóricos (Konno y Ohmachi 1998), lo que explicaría el hecho de que en ciertos casos el método funcione (Lermo y Chávez-García, 1994) y en otros no.

En este trabajo estos resultados solo se utilizaron como valores referenciales, ya que los valores para la zonificación de acuerdo a la amplificación sísmica serán los hallados por el programa de computo SHAKE.

#### 5.5.4.2 Descripción de programa SHAKE

El programa SHAKE calcula las respuestas en un sistema de estratos homogéneos y viscoelásticos, de extensión horizontal infinita, sujetos al viaje vertical de ondas de corte. El sistema es mostrado en la figura 3.15b.

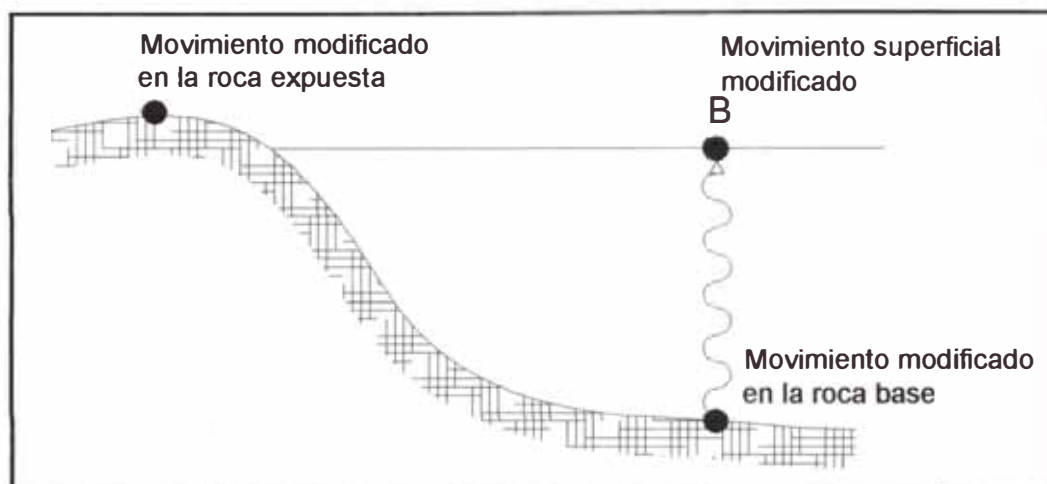


Figura 5.15b: Esquema del proceso para evaluar los efectos locales del suelo

El programa está basado en la solución continua de la ecuación de onda (Kanai, 1951) adaptado para usarse con movimientos transitorios a través del algoritmo de la transformada rápida de Fourier (Cooley y Tukey, 1965). La no linealidad del módulo de corte del amortiguamiento es tomado en cuenta para usar propiedades lineales equivalentes del suelo usando un procedimiento iterativo para obtener valores de módulo y del amortiguamiento compatibles con las deformaciones efectivas en cada estrato.

El programa es capaz de manejar variaciones en ambos, módulo de amortiguamiento, y tomar en cuenta el efecto de la base elástica. El movimiento original usado para el análisis, llamado movimiento objeto puede ser asignado a cualquier estrato del sistema y nuevos movimientos pueden ser calculados en cualquier otro estrato.

Los parámetros que representan las características fundamentales de los suelos son de interés en la dinámica del suelo son:

- La densidad de masa  $\rho$  ( $t \cdot \text{seg}^2 / m^4$ ) o peso unitario ( $t/m^3$ ).

$$\rho = \gamma / 9.8$$

- El módulo de corte  $G$  ( $t/m^2$ ) o velocidad de ondas de corte  $V_s$  (m/seg)

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

- El coeficiente de viscosidad  $\eta$  ( $t \cdot \text{seg}/m^2$ ) o el factor de amortiguamiento  $\beta$ .

### 5.5.4.3 Modelaje de perfiles representativos del suelo

Estos perfiles fueron modelados consultando los estudios de suelo con fines de cimentación así como los registros encontrados con los ensayos de refracción sísmica localizados en el anexo D.

La mayor parte de los estudios para cimentaciones consultados llegan a unos 3 a 5 metros de profundidad como máximo. Por el motivo anterior, la descripción de los primeros estratos es detallado.

Para la estimación de las ondas de corte y la potencia de los estratos se han recorrido a los estudios de refracción sísmica; por último con todos estos valores se a estimado el nivel de roca base de acuerdo a dichos registros, las velocidades de onda de corte, la densidad de cada estrato, el amortiguamiento de los estratos se encuentran descritos en el anexo D.

Con estos estudios, se ha logrado modelar 22 perfiles en lugares distribuidos de la forma mas uniforme posible en el área estudiada.

Para efectuar el análisis de la respuesta dinámica de los suelos bajo sismos de entrada, se ha utilizado el programa SHAKE, en una versión para computadoras personales. Se ha utilizado tres acelerogramas de movimientos fuertes como señales de entrada en la roca base, con las siguientes características acondicionadas para el programa:

SISMOS	FUENTE	COMP	DURACION
17 OCT 1966	IGP	E - W	60 seg.
31 MAY 1970	IGP	E - W	40 seg.
2 OCT 1974	IGP	E - W	60 seg.

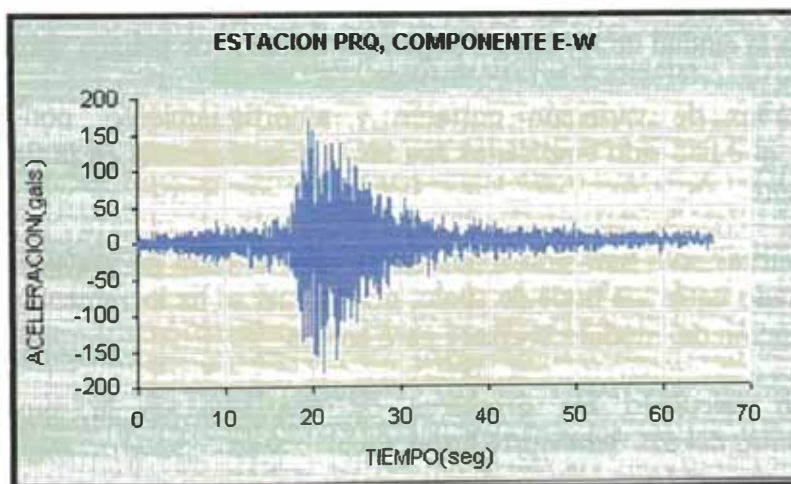


Figura 5.16 Tiempo Historia de aceleración corregida, registrado el 17/10/1966



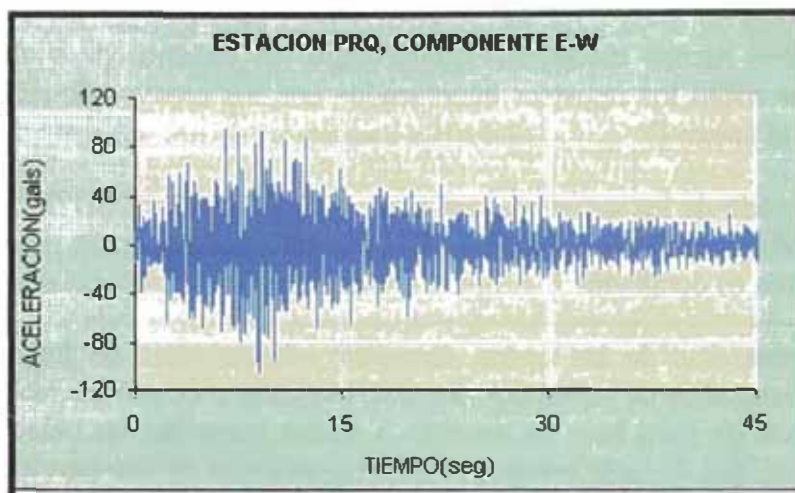


Figura 5.17 Tiempo Historia de aceleración corregida, registrado el 31/05/1970

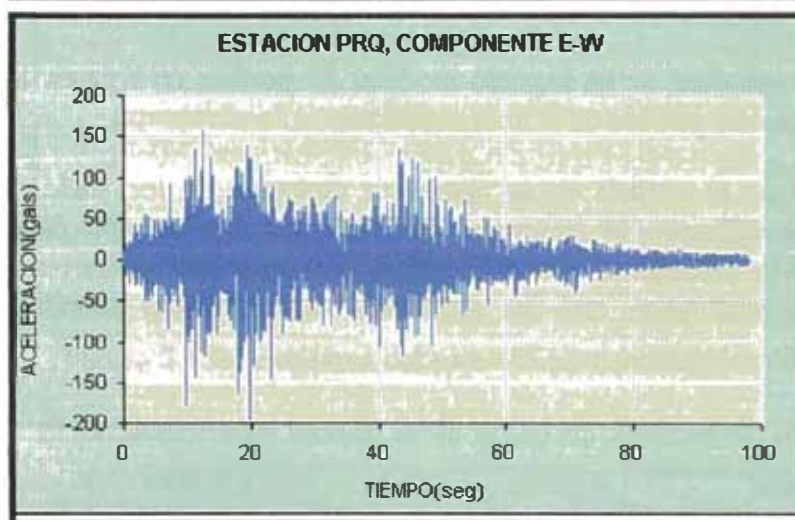


Figura 5.18 Tiempo Historia de aceleración corregida, registrado el 03/10/1974

Los tres acelerogramas se han utilizado con un intervalo de digitación de 0.02 seg., tal como se encuentra en la cinta original. Se ha trabajado con 5 niveles de aceleración máxima del tiempo historia: niveles 0.1 g., 0.2 g., 0.3 g., 0.4 g. y 0.5g.

El nivel 0.3 g. Representa aproximadamente el nivel de aceleraciones esperado para un período de retorno de 475 años, y el de 0.4 g. Para un período de retorno d 950 años para la ciudad de Ayacucho según los estudios de peligro sísmico realizados.

Las curvas de variación cortante y amortiguamiento, con respecto a la deformación, que han sido empleadas son las que se muestran en la figura 5.19 y 5.20 respectivamente.

Estas curvas solo han sido modificadas para el caso de gravas, material que no está considerado entre los tipos de suelo, por lo cual se ha incrementado en un 50% l curva de variación del módulo cortante para arenas.

Se han calculado los espectros de respuesta en la superficie con amortiguamiento del 5% del resorte lineal.



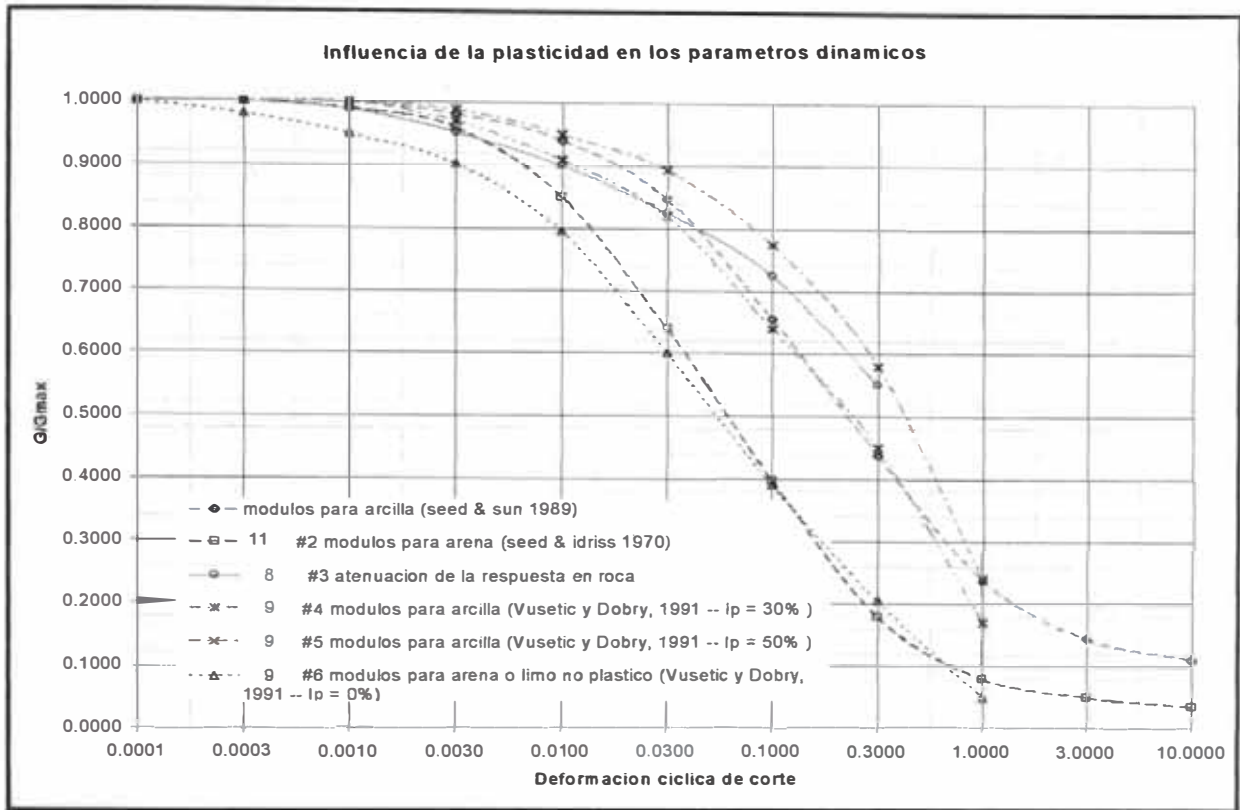


Figura 5.19 Curvas de variación cortante con respecto a la deformación

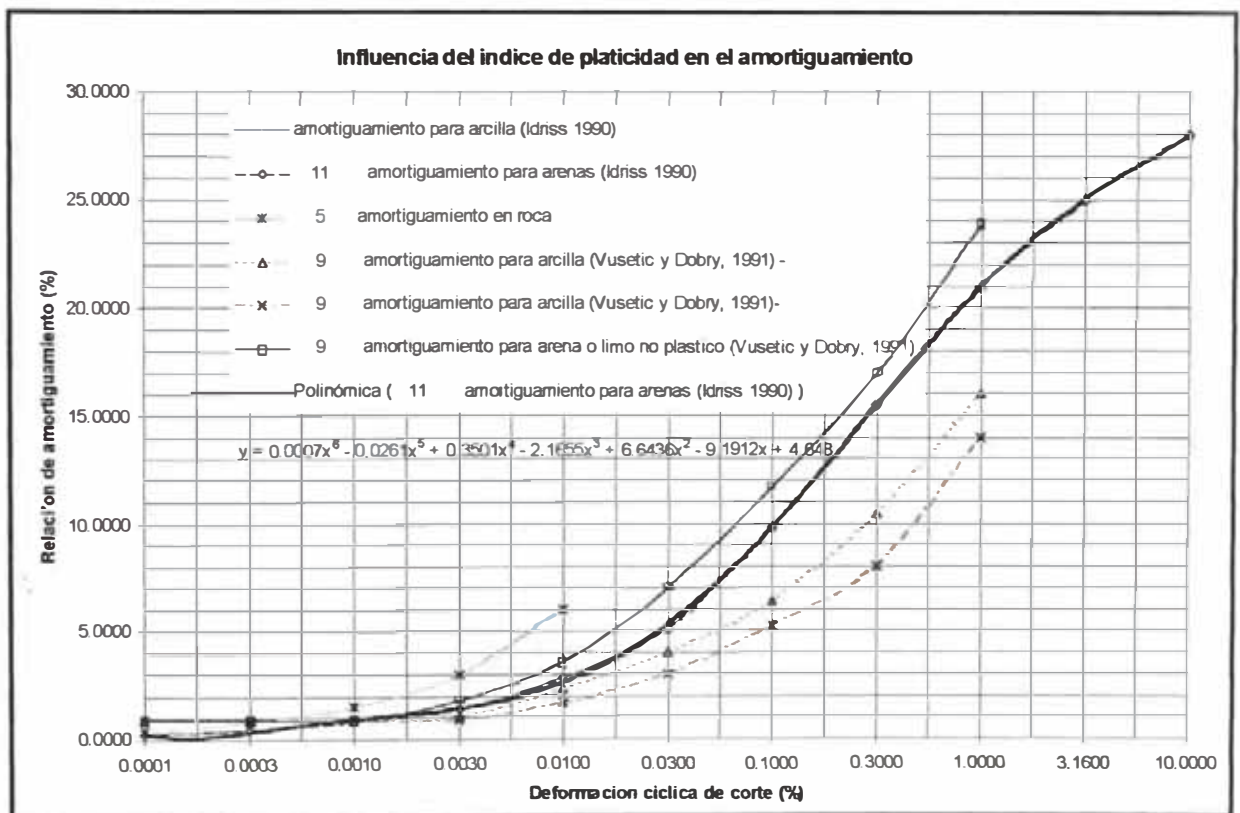


Figura 5.20 Curvas de variación de amortiguamiento con respecto a la deformación

#### 5.5.4.4 Zonificación por amplificación sísmica del área de estudio

Luego de realizar los análisis de amplificación sísmica para los 22 puntos de refracción sísmica, utilizando los tres sismos de entrada, se realizó una zonificación teniendo en consideración estudios anteriores como microtrepidaciones, geotécnica, geológicos y topográficos del área de estudio; los cuales han permitido definir las siguientes zonas las cuales se pueden observar en la lámina 13:

**Zona 1:** Esta zona está representada por una amplificación de 1 a 1.5, los cuales se pueden observar en dos regiones dentro del área de estudio. A continuación se describe las siguientes regiones:

La primera zona lo conforman parte del Complejo Habitacional José Vergara (ENACE), Asoc. Lo Artesanos, Asoc. Madre Covadonga, y la Asoc. Los Olivos; en ellas se pueden observar que existe una primera capa conformada por material limo arenoso bien compacto tipo caliche volcánico que tiene una potencia aproximada de entre 3 a 10 mts. con una velocidad de onda S promedio de 530 m/s.

La segunda zona está conformada por parte del campus de la Universidad Nacional San Cristóbal, Asoc. Ciudad de Cumana y Asoc. Simón Bolívar; En ella se puede observar un material conformado por material gravo areno limoso de semi-compacto a compacto teniendo en algunos lugares material areno limoso con combinaciones de caliche volcánico que tienen una potencia de entre 3 a 7 mts. Con una velocidad de ondas S que van desde 230 m/s a 560 m/s.

**Zona 2:** Esta zona está representada por una amplificación de 1.5 a 2.0, los cuales lo conforman gran parte del campus de la Universidad Nacional San Cristóbal, Asoc. Sector Público, Asoc. 16 de Abril, Calvario, Parte del centro histórico de la ciudad, Barrio la Magdalena, Parte de la Urbanización Las Nazarenas y Asoc. El Arco; en ellas se pueden observar que está conformado en gran parte por materiales gravo areno limoso tipo aluvial de semi-compacto a compacto y limo arenoso en estado compacto con una potencia entre 6 mts. a 15 mts. y velocidades de ondas S de 420 m/s a 870 m/s.

Esta zona tiene esta amplificación debido a que está conformado en gran parte por materiales aluviales, que son acarreados por torrentes a lo largo de las laderas inclinadas, las cuales producen rellenos en antiguas depresiones.

**Zona 3:** Esta zona está representada por una amplificación de 2.0 a 2.5, los cuales lo conforman Asoc. Cerrito La Libertad, Asoc. San Carlos, Villa San Cristóbal, parte de las Nazarenas, Totorilla Alta, Área circundante a la Vía de Evitamiento, Alto Peñón, Asoc. Basilio Auqui, Asociación señor de la Picota, Asoc. Los Licenciados y Santa Teresa. En esta zona la amplificación aparte del tipo de suelo será influida gran medida por las topografías de la zona.

En la parte este del área de estudio está conformado por dos tipos de materiales que son material volcánico sedimentario y areno limos en estado compacto, con potencia entre 8 mts. a 15 mts. y velocidades de ondas S de entre 550 m/s a 660 m/s.

En la parte norte del área de estudio está conformado por un material areno gravo limoso, con una potencia promedio de 8 mts. y velocidad de ondas S promedio de 490 m/s.

Finalmente la parte este del área de estudio está conformado por material caliche bastante intemperizado, con una potencia promedio de 8 mts. y velocidad de ondas S promedio de 680 m/s.

TIPO DE EDIFICACIONES	CT	NPISOS	T=H/CT
Mampostena	60	1	0.04
Pórticos de concreto + muros	45	1	0.05
Pórticos de concreto	35	1	0.07
Mamposteria	60	2	0.08
Pórticos de concreto + muros	45	2	0.11
Pórticos de concreto	35	2	0.14
Mamposteria	60	3	0.12
Pórticos de concreto + muros	45	3	0.16
Pórticos de concreto	35	3	0.21
Mamposteria	60	4	0.16
Pórticos de concreto + muros	45	4	0.21
Pórticos de concreto	35	4	0.27
Mampostena	60	5	0.20
Pórticos de concreto + muros	45	5	0.27
Pórticos de concreto	35	5	0.34
Mamposteria	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

Tabla 5-4. Periodos naturales para diferentes tipos de estructuras (periodos cortos e intermedios) calculados de acuerdo a la norma sismorresistente E-030.

Cabe mencionar que luego de la obtención de las relaciones espectrales presentadas en el anexo D, se puede observar que las plataformas de los espectro de amplificaciones sísmicas de los distintos puntos, se encuentran dentro de un rango de periodos de hasta 0.20 segundos; lo que observando la tabla 5.4 corresponden a edificaciones de 1, 2, 3 y 4 pisos, edificaciones que son las constantes en el área de estudio; por lo que para la evaluación se riesgo sísmico se tendrá que utilizar estos valores de amplificación.

## 5.6 Zonificación geotécnica sísmica del área de estudio

En este acápite se presenta en forma integral las características geotécnicas del área de estudio considerando el comportamiento del suelo bajo solicitaciones de cargas en condiciones estáticas y dinámicas, 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; por lo tanto no necesariamente las áreas representadas en una misma zona van a tener un mismo comportamiento en todos los aspectos considerados. La zonificación propuesta se muestra en la lámina 14 y una descripción de la misma se presenta seguidamente:

**Zona I:** Para poder diferenciar mejor los dos tipos de comportamiento del suelo, se dividió esta zona en dos subzonas, denominadas zona IA y IB.

**Zona IA:** Esta zona lo conforman parte del Complejo Habitacional José Vergara (ENACE), Asoc. Lo Artesanos, Asoc. Madre Covadonga, y la Asoc. Los Olivos; en ellas se pueden observar un material limo inorgánico de baja a alta plasticidad de consistencia firme, estable ante cambios en el contenido de humedad de origen lacustrino muy consolidado sobre terrenos de pendientes desde suave a medianamente suave con una capacidad portante entre 1 a 1.5 kg/cm<sup>2</sup>, estable en laderas muy inclinada, media erosionabilidad por acción hídrica, agresivo al concreto y de una amplificación sísmica entre 1 a 1.5. En esta zona el período predominante del suelo va desde 0.07 a 0.3 seg. por lo que los parámetros de diseño sismorresistente recomendados para esta zona corresponden al suelo Tipo S2.

**Zona IB:** Esta zona lo conforma parte del campus de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Asoc. Ciudad de Cumana y Asoc. Simón Bolívar; en ella se puede observar un material de origen lacustrino del tipo grava limo arenosa formada por la mezcla de piedras subredondeadas de origen sedimentario antiguo y reciente a demás de limo arenoso de baja plasticidad sobre terrenos de pendientes muy suaves; también se puede observar en la parte baja de la zona un material areno limosa formada por alteraciones de tobas, de compacidad media a densa, sobre terrenos de pendientes desde suaves a media; con una capacidad portante de 1.5 a 2.5 kg/cm<sup>2</sup>. En esta zona los suelos no son agresivos al concreto y con un amplificación sísmica entre 1 a 1.5; así como periodos predominantes que varían entre 0.07 a 0.3 seg. por lo que los parámetros de diseño sismorresistente recomendados para esta zona corresponden al suelo Tipo S1.

**Zona II:** Esta zona lo conforman gran parte del campus de la Universidad Nacional San Cristóbal, Asoc. Sector Público, Asoc. 16 de Abril, Calvario, Parte del centro histórico de la ciudad, Barrio la Magdalena, Parte de la Urbanización Nazarenas y Asoc. El Arco; en ellas se pueden observar que está conformado en parte por materiales grava areno limoso tipo aluvial - fluvial así como lacustrinos e algunas zonas de semi-compacto a compacto, así como limo arenoso de baja plasticidad sobre terrenos de pendiente de suave a media; con una capacidad portante que varía entre 1.5 a 2 kg/cm<sup>2</sup>. Esta zona tiene una amplificación de 1.5 a 2, las cuales son debido a que está conformado en gran parte por materiales aluviales, que acarreados por torrentes a lo largo de las laderas inclinadas, las cuales producen rellenos en antiguas depresiones. En esta zona el período predominante del suelo

desde 0.07 a 0.3 seg. por lo que los parámetros de diseño sismorresistente recomendados para esta zona corresponden al suelo Tipo S2.

**Zona III:** Para poder diferenciar mejor los dos tipos de comportamiento del suelo, se dividió esta zona en dos subzonas, denominadas zona IA y IB.

**Zona IIIA:** Esta zona lo conforman parte de las Nazarenas, Totorilla Alta, Área circundante a la Vía de Evitamiento, Alto Perú, Asoc. Basilio Auqui, Asociación señor de la Picota, Asoc. Los Licenciados y Asoc. Santa Teresa. Esta subzona a su vez se puede dividir en alta y baja, en la parte alta se puede observar un material de origen lacustrino del tipo grava limo arenosa formada por la mezcla de piedras subredondeadas de origen sedimentario antiguo y reciente a demás de limo arenoso de baja plasticidad sobre terrenos de pendientes media a alta; también se puede observar en la parte baja de la zona un material que se trata de una roca del tipo aglomerado volcánico y basalto de estructura vacuolar envuelto en una matriz limo arenosa de baja plasticidad, ubicado sobre terrenos de pendientes desde suaves a fuerte.

Esta zona presenta una capacidad portante de entre 2 a 2.5 kg/cm<sup>2</sup> en la parte superior y mayores a 4 kg/cm<sup>2</sup> en la parte inferior; presentando una amplificación sísmica de entre 2 a 2.5 y un período predominante del suelo de entre 0.07 a 0.1 seg. así como esta zona es propensa a sufrir grandes amplificaciones sísmicas por efectos topográficos y posibles problemas de inestabilidad de taludes; por lo que los parámetros de diseño sismorresistente recomendados para esta zona corresponden al suelo Tipo S2.

**Zona IIIB:** Esta zona lo conforman Asoc. Cerrito La Libertad, Asoc. San Carlos, Villa San Cristóbal; en ellas se pueden observar que está conformado en gran parte por materiales gravo areno limoso tipo lacustrinos, así como limo arenoso de baja plasticidad sobre terrenos de pendiente de media a alta; con una capacidad portante que varía entre 1.5 a 2 kg/cm<sup>2</sup>. Esta zona tiene una amplificación de 2 a 2.5; en esta zona el periodo predominante del suelo va desde 0.1 a 0.3 seg. 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 más desfavorables. En caso de proyectarse la construcción de edificaciones en esta zona, para el diseño sismorresistente se deberá considerar el comportamiento dinámico del terreno similar al de un suelo Tipo S3 del RNC.

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

Como se mencionó, 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 del 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 5.21 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.

El movimiento a nivel de basamento rocoso fue analizado en el acápite 5.2 y la amplificación sísmica fue tratada en el acápite 5.5.4, con lo cual se puede generar el mapa de amenaza final superponiendo ambos mapas, para cada sismo escenario tal como se muestra en las láminas 16 y 17.

El mapa de amenaza sísmica, obtenido en base a la integración de los fenómenos geodinámicos, además de ser expresada en términos de la aceleración máxima del terreno ( $g$ ,  $gals$  ó  $cm/s^2$ ), también puede ser 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.

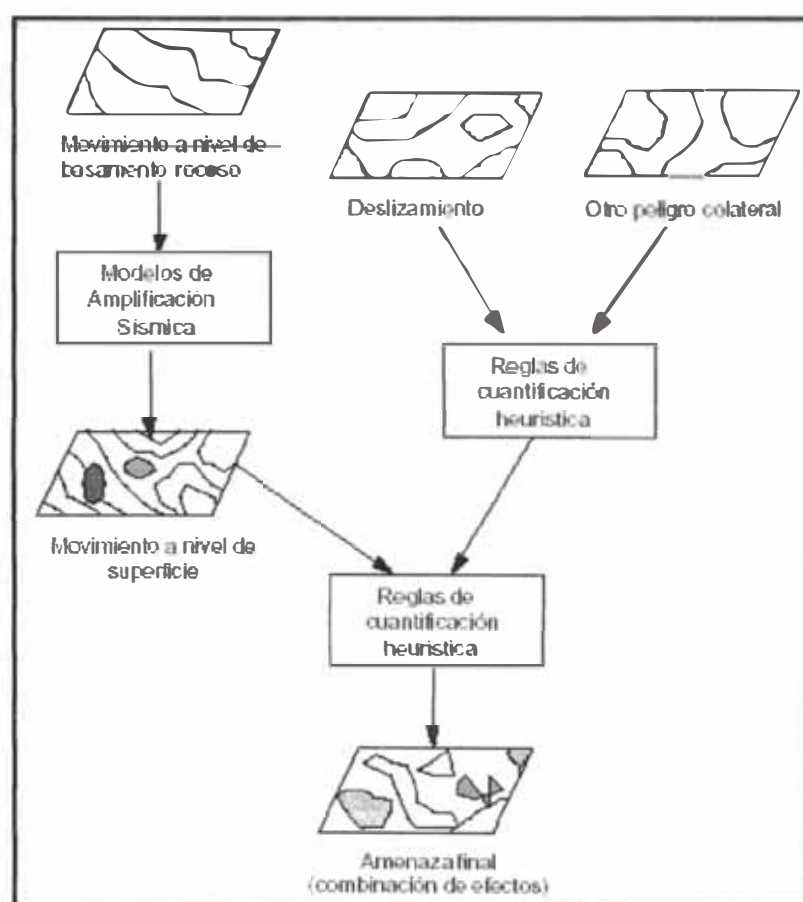


Figura 5.21: Integración de los fenómenos geodinámicos en el entorno SIG.

La forma de la ecuación que permite el paso de intensidades a aceleraciones es la indicada en la siguiente ecuación:

$$\text{Log}A = \sigma I_{MM} + \gamma$$

Algunos valores de  $\sigma$  y  $\gamma$  se indican en la Tabla 5-5, los cuales han sido obtenidos de estudios de aproximación lineal con los datos de Intensidades y aceleración máximas del suelo. Evidentemente, la relación entre la  $I_{MM}$  y la Aceleración del suelo es más compleja. Pero las relaciones indicadas en la Tabla 5-5 han sido usadas en la determinación de leyes de atenuación para la aceleración máxima  $d$

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. De acuerdo a los trabajos realizados anteriormente (Riesgo Sísmico de la ciudad de Moquegua-2002) 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 en la zona sur del Perú. Esta relación de Saragoni fue usada para estimar la intensidad sísmica de los sismos escenarios, principalmente porque no se encontró otras relaciones que pudieran aproximarse más a la realidad.

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

Tabla 5-5: Valores de  $\sigma$  y  $\gamma$

En las Láminas 16 y 17 se podrán observar también los sismos escenarios con sus respectivas transformaciones de sus valores en intensidades; teniéndose valores de VIII MM. y IX MM. tanto para un sismo con un periodo de retorno de 475 años y de 950 años.

## 5.7 Levantamiento estructural de las edificaciones evaluadas

### 5.7.1 Selección del área urbana para la evaluación de riesgo sísmico

Una vez obtenida los planos catastrales de la ciudad de Ayacucho se procedió a estudiar las distintas zonas de la ciudad para observar cuál de ellas tenía información estructural de sus predios más completa, es decir cuál poseía información de todas las variables y categorías listadas en la metodología de índice de Vulnerabilidad en especial en lo que refiere al área construida y tipo del material de construcción del lote. El que presentara dicha característica sería tomado como zona de estudio piloto para realizar el estudio de riesgo sísmico.

Dentro de este análisis se encontró que el barrio de la Magdalena era el que cumplía con los requerimientos básicos para la metodología, ya que se pudo observar gran cantidad de construcciones de mampostería.

Con esta evaluación se pretenden demostrar que con la información que maneja la oficina de Catastro Municipal no se puede realizar estudios más realistas de vulnerabilidad sísmica para toda la ciudad, ya que no cuenta con informaciones básicas e incluso con ninguna información.

### 5.7.2 Información necesaria vs disponible

La información necesaria para completar los 11 parámetros que presentaba el método no se podían obtener directamente de la información que maneja la oficina de catastro municipal de la ciudad de Ayacucho para cada una de las viviendas de la zona

de estudio. Sin embargo, se obtuvo información directa sobre estas viviendas a través de las encuestas realizadas sobre cada uno de los lotes del área de estudio.

Para la concepción de la ficha de evaluación se requieren de dos sistemas de clasificaciones. Un sistema clasifica a cada estructura de acuerdo a su respuesta estructural debido a la excitación sísmica, para propósitos de estimación de daño 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. En la continuación se presenta la ficha utilizada para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en el área de estudio.

<b>1.0 Identificación</b>		
1.1 Urbanización .....	1.4 Av, Calle, Jr, Psj .....	N° .....
1.2 N° de manzana .....	1.5 N° de habitantes .....	
1.3 N° de lote .....	1.6 Teléfono .....	
<b>2.0 Tipo de construcción</b>		<b>3.0 Tipo de estructura</b>
2.1 Lote sin construir <input type="checkbox"/>		3.1 Mampostería de ladrillo <input type="checkbox"/>
2.2 Vivienda unifamiliar <input type="checkbox"/>		3.2 Adobe, quincha y tapial <input type="checkbox"/>
2.3 Multifamiliar <input type="checkbox"/>		3.3 Pórticos de C°A° <input type="checkbox"/>
2.4 Edificio <input type="checkbox"/>		3.4 Pórticos de acero <input type="checkbox"/>
2.5 Local comercial <input type="checkbox"/>		3.5 Madera <input type="checkbox"/>
2.6 Local industrial <input type="checkbox"/>		3.6 Piedra <input type="checkbox"/>
2.7 Local en construcción <input type="checkbox"/>		3.7 otros (Incluye lotes sin construir) <input type="checkbox"/>
2.8 Local demolido <input type="checkbox"/>		
<b>4.0 Descripción</b>		
4.1 Año de construcción .....	4.4 Autoconstrucción <input type="checkbox"/>	
4.2 N° Total de pisos .....	4.5 Asistido por un profesional a fin <input type="checkbox"/>	
4.3 Zócalos .....		
<b>5.0 Tipo y organización del sistema resistente (Marcar sólo uno)</b>		
5.1 Confinamiento mediante columnas y vigas o arriostramientos horizontales y verticales <input type="checkbox"/>		
5.2 Muros bien ligados sin vigas <input type="checkbox"/>		
5.3 Muros no ligados, sin vigas ni columnas o sin arriostramientos <input type="checkbox"/>		
<b>6.0 Calidad del sistema Resistente (Marcar todos los que corresponda)</b>		
6.1 Mampostería de buena calidad con piezas homogéneas y de dimensiones constantes <input type="checkbox"/>		
6.2 Muros con mampostería de fabricación artesanal en toda su extensión <input type="checkbox"/>		
6.3 Presencia de buen amarre en las unidades de mampostería <input type="checkbox"/>		
6.4 Mortero de buena calidad y con espesores según norma <input type="checkbox"/>		
<b>7.0 Pendiente del terreno</b>		
Nula <input type="checkbox"/>	Regular <input type="checkbox"/>	Fuerte <input type="checkbox"/>
<b>8.0 Diafragma Horizontal (Marcar todas las que corresponda)</b>		
8.1 Losas con desnivel <input type="checkbox"/>		
8.2 Tipo de material de losa:		
1) concreto armado <input type="checkbox"/>	2) madera <input type="checkbox"/>	3) otros .....
<b>9.0 Configuración en Elevación</b>		
9.1 Presencia de tanque elevado de concreto armado <input type="checkbox"/>		
9.2 N° de pisos construidos en sólo una porción del área total construida		
1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
4 <input type="checkbox"/>	otros .....	
<b>10.0 Tipo de cubierta</b>		
10.1 Buena estructura resistente <input type="checkbox"/>		
10.2 Tipo de material de a cubierta		
1) C°A° <input type="checkbox"/>	2) Teja y barro <input type="checkbox"/>	3) Eternit, calamina, material liviano <input type="checkbox"/>
<b>11.0 Elementos no estructurales</b>		
	Bien ligados a la pared	Mal ligados a la pared
11.1 Comiza y Parepetos <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11.2 Tanques de agua pre-fabricados <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11.3 Balcones y volados <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11.4 Pequeños elementos <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**12.0 Estado de conservación**

12.1 Estado de conservación general de la edificación:

1) Bueno

2) Malo

3) Muy malo

12.2 Muros en buena condición, sin lesiones visibles

12.3 Edificio que no presentan lesiones pero en un estado mediocre de conservación

12.4 Muros que presentan pequeñas fisuras

12.5 Muros con lesiones de tamaño medio o lesiones producidas por sismos

12.6 Muros con fuerte deterioro en sus componente

12.7 Pórticos:

1) Buen estado de conservación

2) Ligeramente dañados

3) Mal estado de conservación

**13.0 Fotografía**

**14.0 Croquis**

**15.0 Observaciones adicionales y comentarios**

.....

.....

.....

.....

**ENCUESTA**

Fecha     
 Día Mes Año

Nombre .....

Firma .....

**CONTROL**

Fecha     
 Día Mes Año

Nombre .....

Firma .....

**DIGITACION**

Fecha     
 Día Mes Año

Nombre .....

Firma .....



Como información proporcionada del catastro urbano de la municipalidad, se obtuvo datos como: área de los lotes, área construida de cada lote, tipo de material; como información directa obtenida a través de las evaluaciones estructurales de las viviendas del área en estudio se pueden mencionar básicamente: número de pisos, año de construcción de la edificación, ubicación de la misma, estrato socioeconómico, tipo de cubierta, configuración estructural y no estructural, uso de edificación y otros que se muestran en la ficha catastral.

Para la toma de datos lote por lote, se requirió de gran cantidad de personas con nociones básicas sobre construcción; en este caso se pudo obtener la ayuda de estudiantes del último año del Instituto Tecnológico Víctor Álvarez Huapalla en la cantidad de 15 personas durante un tiempo de un mes y medio de trabajo constantes; durante la evaluaciones nos encontramos con muchos obstáculos para dicha evaluación tales como: la falta de Apoyo de las Instituciones del medio para este trabajo, falta de cooperación de los propietarios de los predios encuestados y falta de presupuesto. A pesar de todos estos inconvenientes, sumado al corto plazo de apoyo que se pudo obtener de los encuestadores se pudo concluir con la totalidad del barrio de la Magdalena e inclusive tratando de abarcar la mayor cantidad de lotes posibles; de esta manera se pudo redefinir el área para el estudio de riesgo sísmico, incluyendo además del barrio de la Magdalena a la urbanización Simón Bolívar y la Asociación Ciudad de Cumana, tal como se puede observar en la lámina 18.

### **5.7.3 Inventario de 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. Los métodos más ampliamente usados envuelven una consolidación de información contenida en diferentes bases de datos, en la cual se encuentra contenida en 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

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. 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 daño estructural esperado para una intensidad sísmica dada.

La base de datos aprovechable para compilar un inventario de estructuras pueden 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 variadas fuentes privadas y públicas. Los atributos perdidos son frecuentemente inferidos desde información conocida, por el uso de opinión de expertos ó lógica difusa. Avances tecnológicos 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.

Las fuentes de datos de instituciones públicas, como es el caso de la Municipalidad Provincial de Huamanga, fueron obtenidas para este estudio; pero los datos que pudieron utilizar eran mínimos en algunos casos nulos, por tal razón estos obtuvieron a través de las encuestas.

La base de datos utilizada en el presente estudio es de 1527 lotes, los cuales fueron unidos a la base gráfica del entorno SIG en su totalidad. En muchos casos dentro de mismo lote se encontró mas de una edificación evaluándose la más vulnerable tomando ésta como la representativa del lote.

La distribución de lotes encuestados por barrio, urbanización y Asociación como sigue:

Zonas de estudio	Nº de lotes	Porcentaje
Barrio la Magdalena	794	52.00%
Asoc. Ciudad de Cumana	333	21.81%
Urb. Simón Bolívar	400	26.20%
TOTAL	1527	100.00%

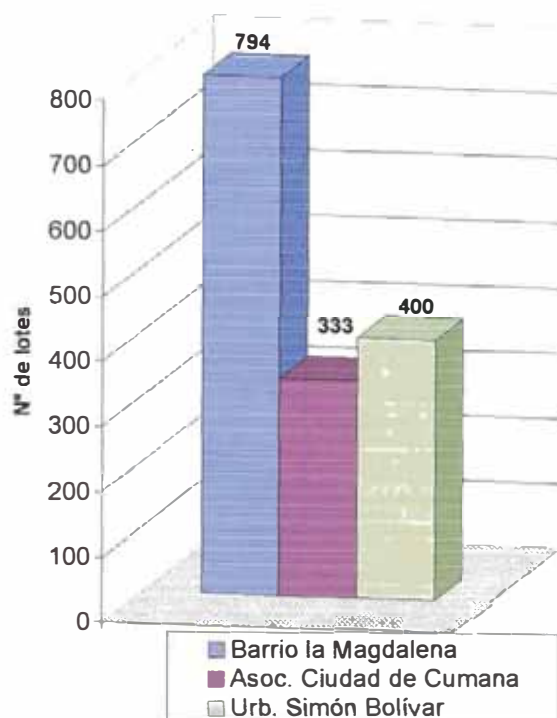


Fig. 5.22 Distribución del número de edificaciones de acuerdo a las zonas de estudio.

A continuación se presentan una detallada base de datos que hace referencia a las tipologías constructivas de los edificios de la ciudad. Esta información constituye la base fundamental de este trabajo, porque identifica claramente el material utilizado en la construcción del edificio, lo que permite realizar un análisis más completo del riesgo sísmico.

Hasta aquí se dispone con la base de datos de la tipología constructiva, con lo cual se conoce la superficie en planta de los edificios, el número de niveles construidos por encima y por debajo de la rasante, así como el año de construcción, asistencia técnica, uso de la construcción, altura de edificación, número de habitantes aproximados y otros. Sin embargo, la riqueza de los datos disponibles permite realizar de una forma más completa la estimación del daño sísmico esperado en la ciudad, apoyada de la metodología adoptada para este trabajo, que no sólo toma en cuenta los datos anteriores, sino que también considera características más detalladas de los edificios.

La base de datos que contiene la información del material utilizado en la construcción de las partes principales de un edificio identifica al edificio y la estructura, muro, Diafragma horizontal, cubierta, fachada y piso, para las cuales se tiene información del material de construcción.

Las características de las edificaciones según las fichas catastrales son las siguientes:

➤ **Área construida**, Dentro de los datos que la municipalidad Provincial de Huamanga nos pudo otorgar, se encuentra el área construida de los 1527 lotes en formato de archivos de autocad, para lo cual se tuvo que procesar encontrando el área construida, así como el perímetro, centro de gravedad en planta de las edificaciones para los distintos cálculos dentro del método.

Se puede mencionar que existen mayor cantidad de lotes con áreas construidas de entre 50 a 100 m<sup>2</sup>; la distribución restante de la cantidad de lotes por área construidas se puede observar en la figura 5.23 y su tabla respectiva

Area construida (m <sup>2</sup> )	N° de lotes	Porcentaje
sin construir	65	4.26%
0 - 50 m <sup>2</sup>	332	21.74%
51 -100 m <sup>2</sup>	569	37.26%
101 - 150 m <sup>2</sup>	300	19.65%
151 -200 m <sup>2</sup>	143	9.36%
201 - 250 m <sup>2</sup>	52	3.41%
251 - 300 m <sup>2</sup>	32	2.10%
301 - 400 m <sup>2</sup>	20	1.31%
mayores a 401 m <sup>2</sup>	14	0.92%
TOTAL	1527	100.00%

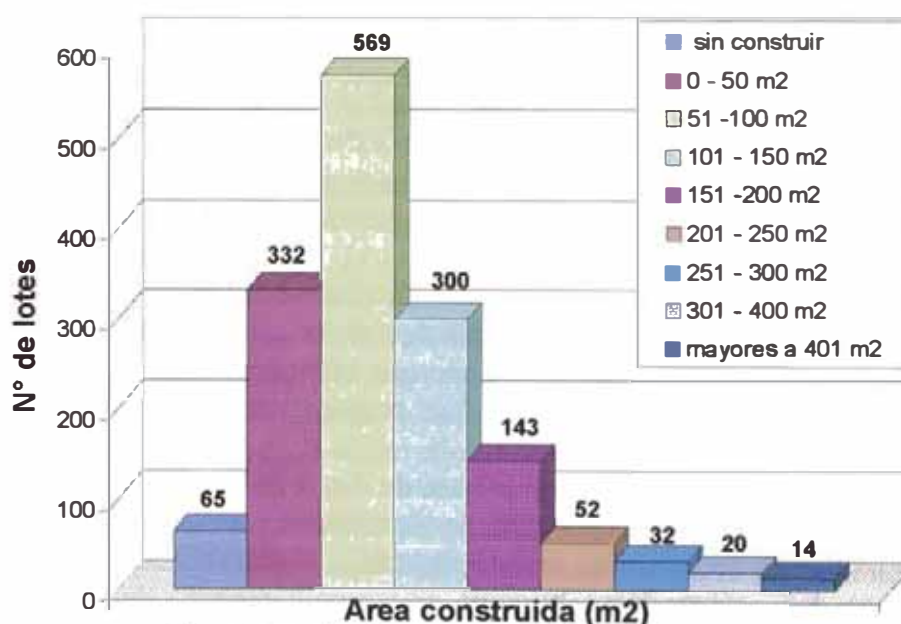


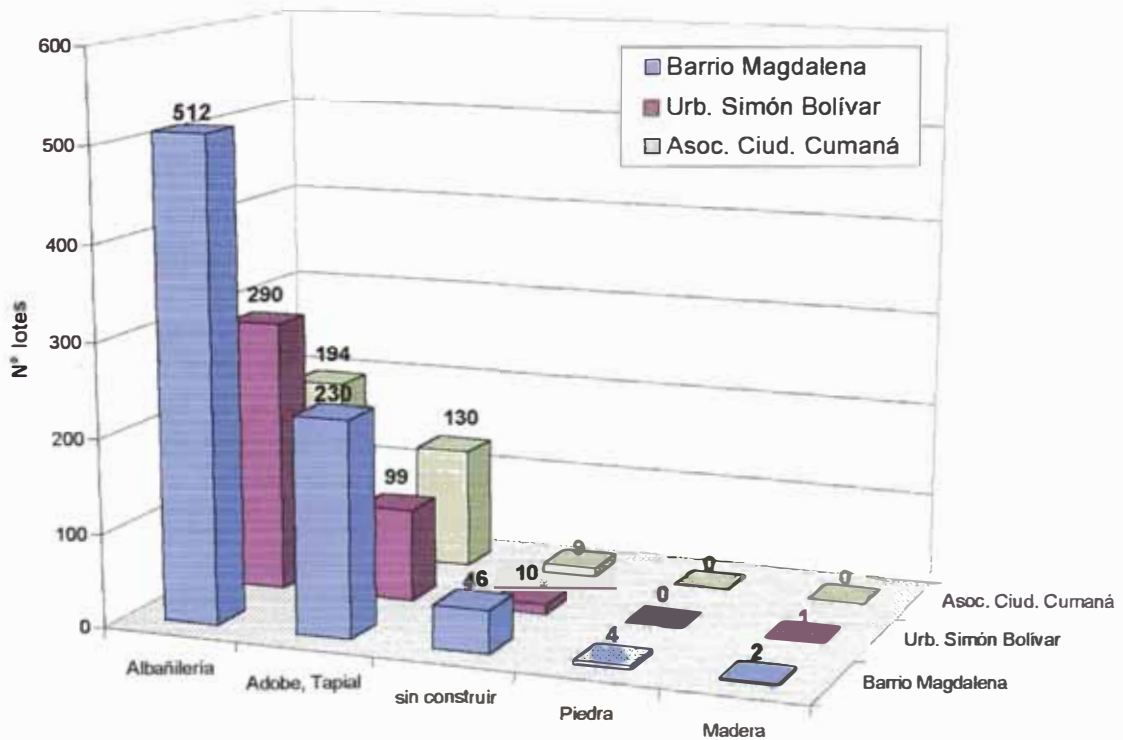
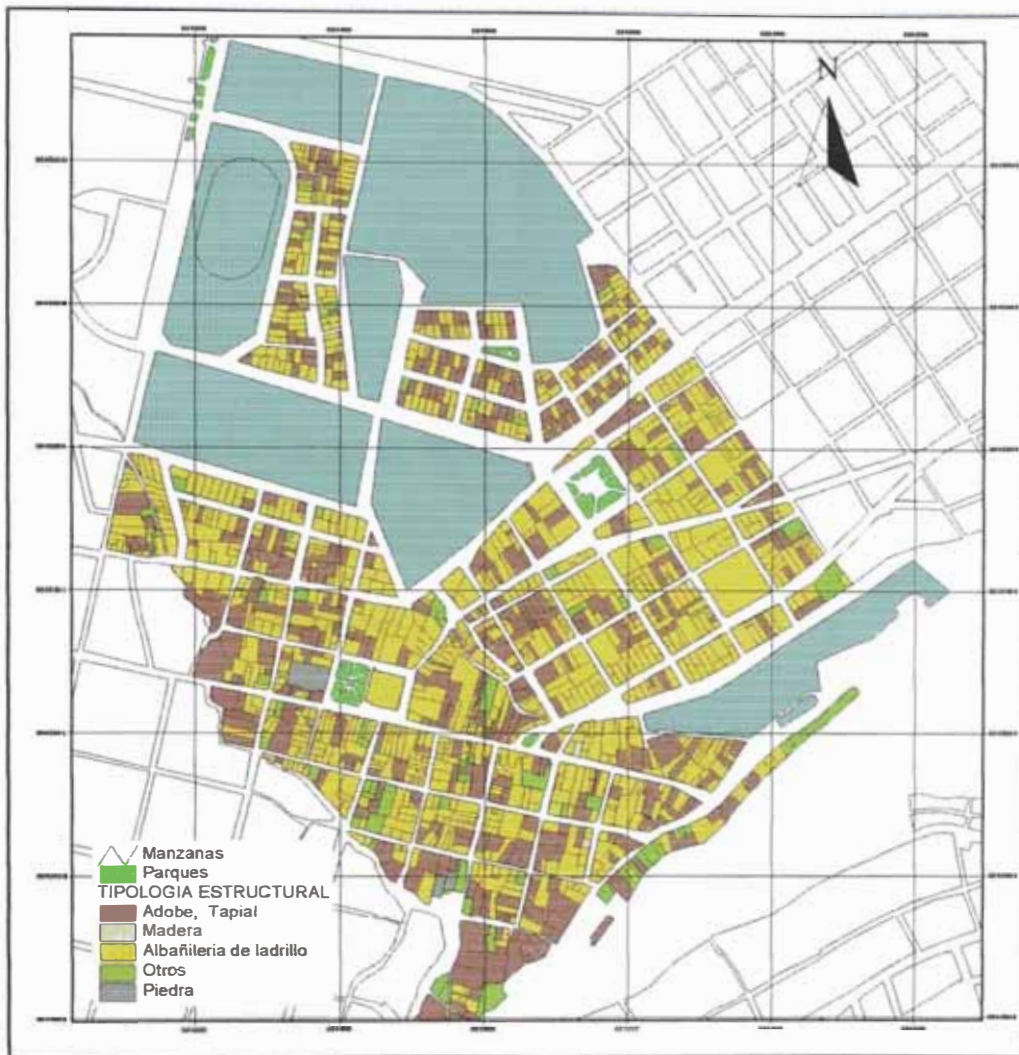
Fig. 5.23 Distribución según áreas construidas

➤ **Tipo de edificación,** Todas las edificaciones inventariadas fueron clasificadas de acuerdo al tipo de estructural que la conforman, en algunos casos se encontraron edificaciones con dos tipos de material y se tomó a la más representativa; en el análisis se encontró 5 categorías tal como se puede observar en la distribución de la figura 5.24.

Dentro de esta distribución se puede observar de una manera generalizada que el material de construcción más utilizado es la albañilería, con un porcentaje de 65.23% seguido del adobe y tapial con un 30.06%; estos dos tipos son los más abundantes, el resto están en un menor porcentaje.

Realizando un análisis zona por zona se puede observar que la Urb. Simón Bolívar cuenta con el mayor porcentaje de albañilería respecto al total de sus construcciones la Asoc. Ciudad. de Cumaná cuenta con el mayor porcentaje en adobe respecto a las demás zonas.







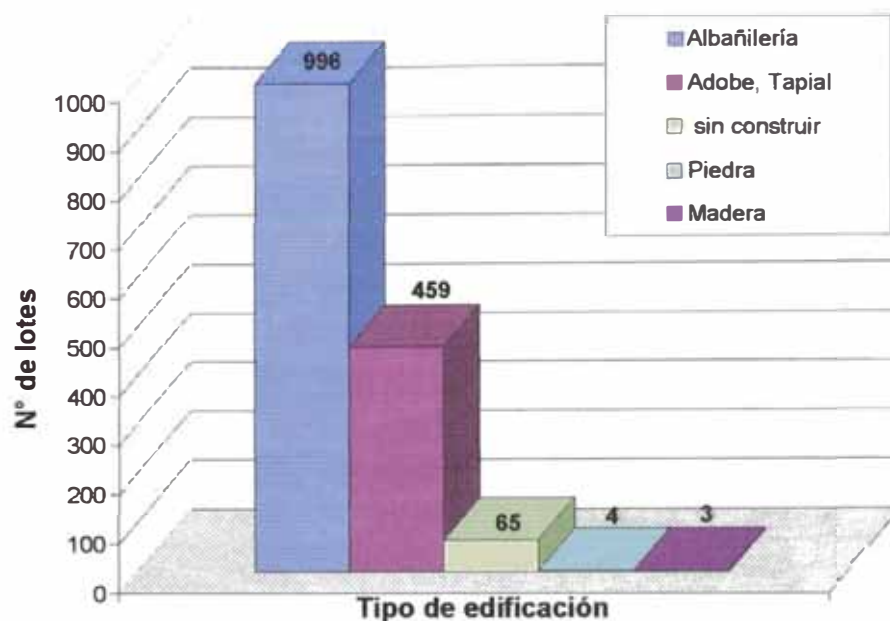


Fig. 5.24 Distribuciones según tipo de edificación

TIPO DE EDIFICACION	Barrio Magdalena	Urb. Simón Bolívar	Asoc. Ciud. Cumaná	TOTAL
Mampostería	512	290	194	996
Adobe, Tapial	230	99	130	459
sin construir	46	10	9	65
Piedra	4	0	0	4
Madera	2	1	0	3
TOTAL	794	400	333	1527

➤ **Año de construcción**, esta información constituye una parte importante de la base de datos, porque permitirá conocer algunas características generales de los edificios como podría ser el estado de conservación, se puede ingerir el material que se utilizó en la construcción apoyándose en documentos históricos, ver la evolución en el crecimiento de la ciudad en las zonas de estudio e inclusive señalar los años en donde aparecen las normas sismorresistentes.

En el análisis se ha observado que la zona en donde existen los edificios mas antiguos es, sin duda, el Barrio de la Magdalena; el siguiente paso es agrupar los edificios de acuerdo a su año de construcción en una forma total; estos períodos nos permitirán distinguir épocas que se pueden asociarse a algunos eventos especiales de la ciudad, por ello se puede observar que entre los años de 1980 al 2003, se dio el mayor crecimiento, revisando de una forma rápida la historia de la ciudad, se ha podido comprobar que la luego de la violencia terrorista se produjo el desplazamiento de grandes masas de refugiados del campo a la ciudad dando origen al crecimiento poblacional y por ende de viviendas.

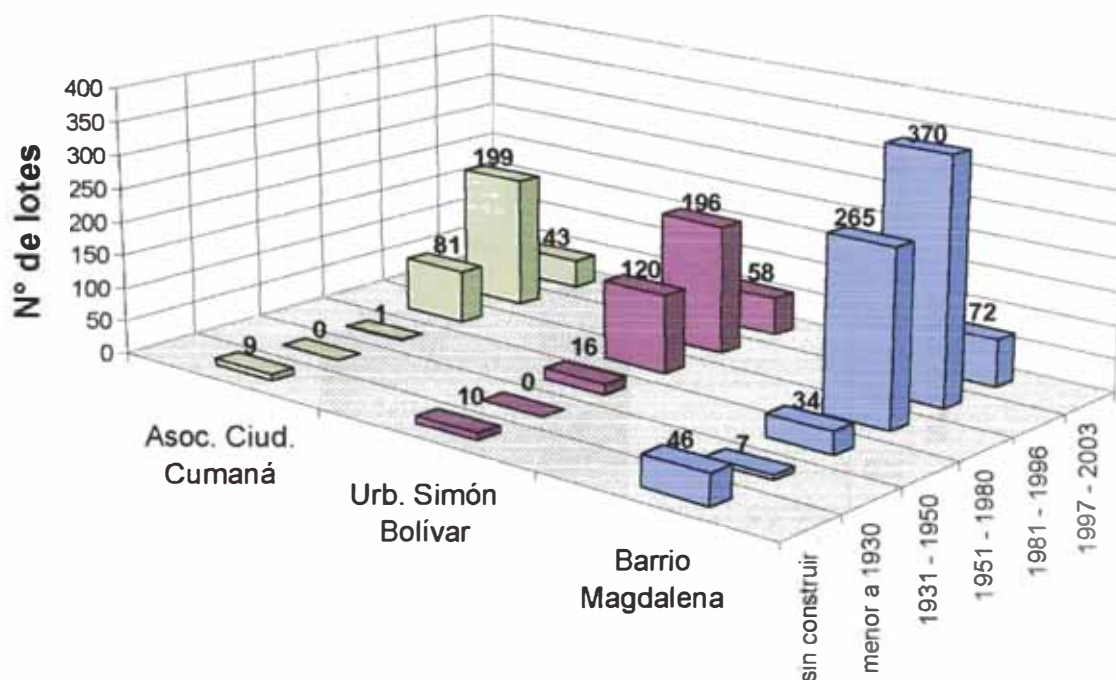


Fig. 5.26 Distribución de lotes de acuerdo al año de construcción y por zonas de estudio.

AÑO DE CONSTRUCCIÓN	Barrio Magdalena	Urb. Simón Bolívar	Asoc. Ciud. Cumaná	TOTAL
sin construir	46	10	9	65
menor a 1930	7	0	0	7
1931 - 1950	34	16	1	51
1951 - 1980	265	120	81	466
1981 - 1996	370	196	199	765
1997 - 2003	72	58	43	173
<b>TOTAL</b>	<b>794</b>	<b>400</b>	<b>333</b>	<b>1527</b>

➤ **Número de pisos**, en el análisis se puede observar que las construcciones son mayormente de 1 y 2 pisos, esto debido a las condiciones económicas de las zonas en estudio, corroborando esta afirmación con que en estas zonas no existe mucho movimiento económico; además que el tipo de construcción de adobe y albañilería está limitado en cuanto a su altura.

Nº DE PISOS	Nº de lotes	Porcentaje
sin construir	65	4.26%
1 piso	669	43.81%
2 pisos	439	28.75%
3 pisos	286	18.73%
4 pisos	59	3.86%
5 pisos a más	9	0.59%
<b>TOTAL</b>	<b>1527</b>	<b>100.00%</b>

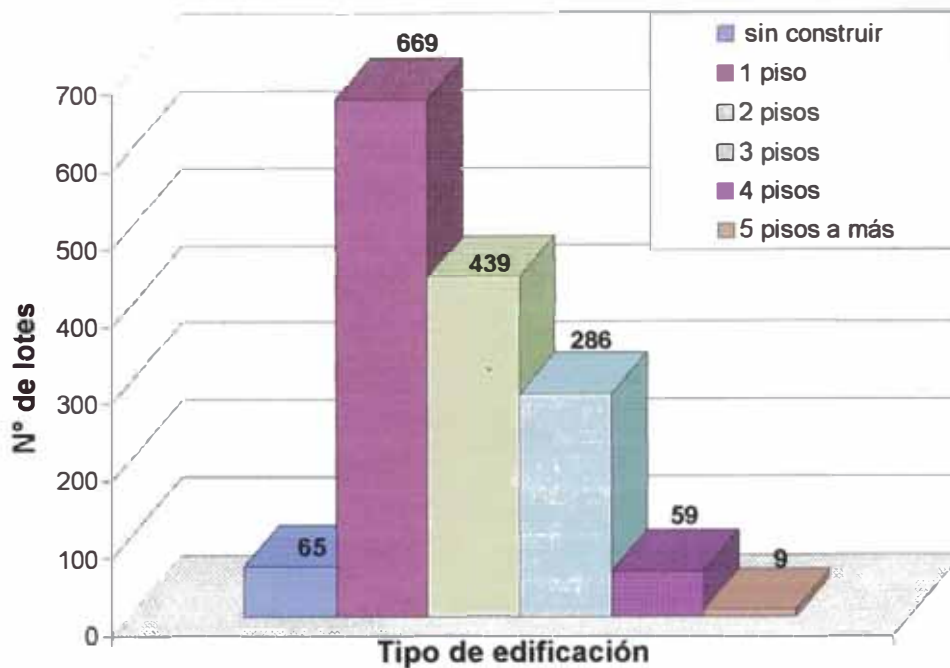


Fig. 5.27 Distribución de lotes de acuerdo al número de pisos.

► **Irregularidad en planta**, según los resultados se puede observar que en las zonas de estudio la mayor parte de las construcciones son regulares en un 80.68%; esto debido a la practica constructiva adoptada por los constructores de la zona, que generalmente buscan la simplicidad en las edificaciones.

Irregularidad en planta	N° de lotes	Porcentaje
sin construir	65	4.26%
Regular	1232	80.68%
Irregular	230	15.06%
TOTAL	1527	100.00%

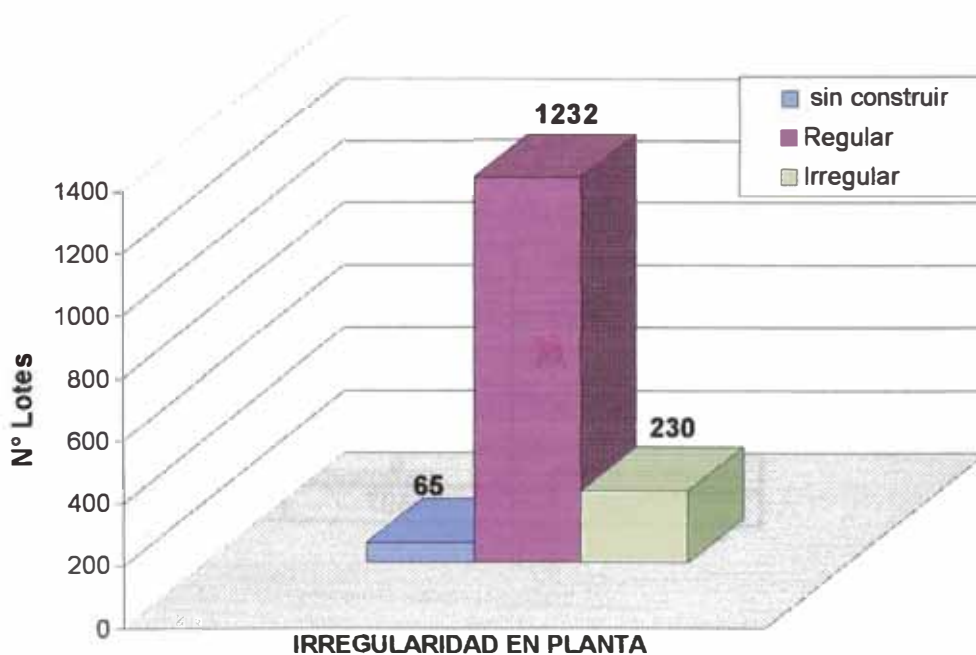


Fig. 5.28 Distribución de lotes de acuerdo a la irregularidad en planta.

➤ **Irregularidad en elevación,** De lo observado de las zonas de estudio se puede mencionar que el 71.38% de las edificaciones evaluadas tienen una regularidad en elevación, mientras que el 24.36 % son irregulares.

Irregularidad en elevación	N° de lotes	Porcentaje
sin construir	65	4.26%
Regular	1090	71.38%
Irregular	372	24.36%
TOTAL	1527	100.00%

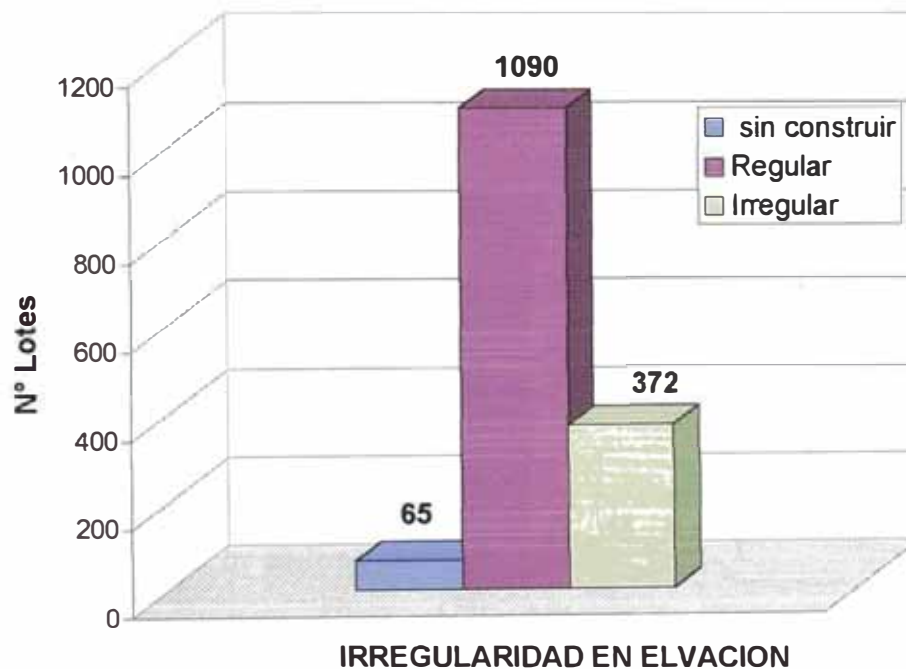


Fig. 5.29 Distribución de lotes de acuerdo a la irregularidad en elevación.

➤ **Asistencia técnica,** Este parámetro nos refleja la realidad de las construcciones en nuestra zona de estudio y porque no generalizar al resto de la ciudad, ya que de lo observado se puede ver que solo el 28.73% de las construcciones recibieron una asistencia técnica y por ende podríamos suponer que tienen un buen comportamiento estructural; más por el contrario el 71.27% de las estructuras son producto de una autoconstrucción.

De acuerdo a las estadísticas de asistencia técnica por el año de construcción, se puede observar que en los últimos 20 años, el porcentaje de construcciones con una asistencia técnica va incrementándose.

Por todo lo observado se puede decir que las construcciones sin asistencia técnica son propensas a sufrir daños, esto debido a la falta de control en su proceso constructivo y mala concepción estructural, o en algunos sobredimensionarlos y hacerlos antieconómicos.

AÑO DE CONSTRUCCIÓN	Sin asistencia técnica	Con asistencia técnica	TOTAL
sin construir			65
menor a 1930	7	0	7
1931 - 1950	51	0	51
1951 - 1980	399	67	466
1981 - 1996	515	250	765
1997 - 2003	70	103	173
SUBTOTAL	1042	420	1527

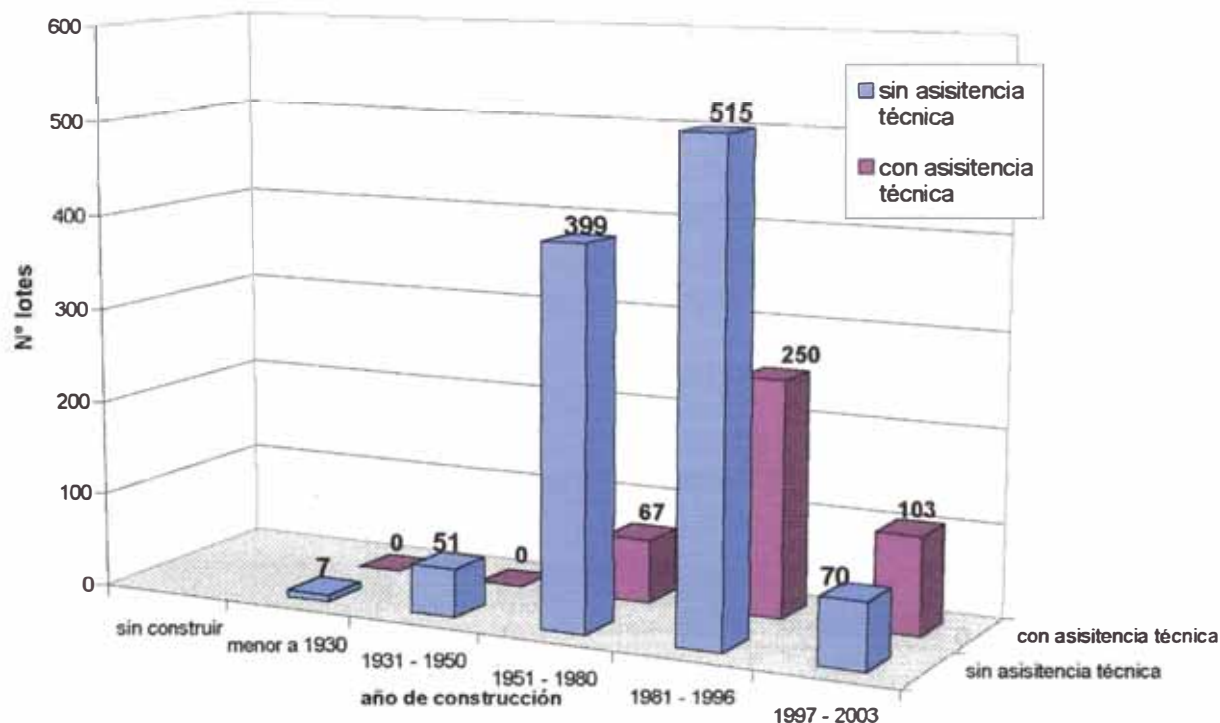


Fig. 5.30 Distribución de lotes de acuerdo a la asistencia técnica recibida.

➤ **Uso de la edificación,** De lo observado el 69.48% de las construcciones son viviendas unifamiliares, seguida de locales comerciales y viviendas multifamiliares con 13.29% y 12.70% respectivamente.

Se puede notar que en la zona de estudio el desarrollo comercial es relativamente bajo, esto influirá bastante en el costo de las edificaciones por metro cuadrado; por ello será menor el costo en pérdidas económicas si se produjera un evento sísmico.

Uso de edificación	N° de lotes	Porcentaje
Lote sin construir	65	4.26%
Vivienda Unifamiliar	1061	69.48%
Multifamiliar	194	12.70%
Local en Construcción	4	0.26%
Local Comercial	203	13.29%
TOTAL	1527	100.00%



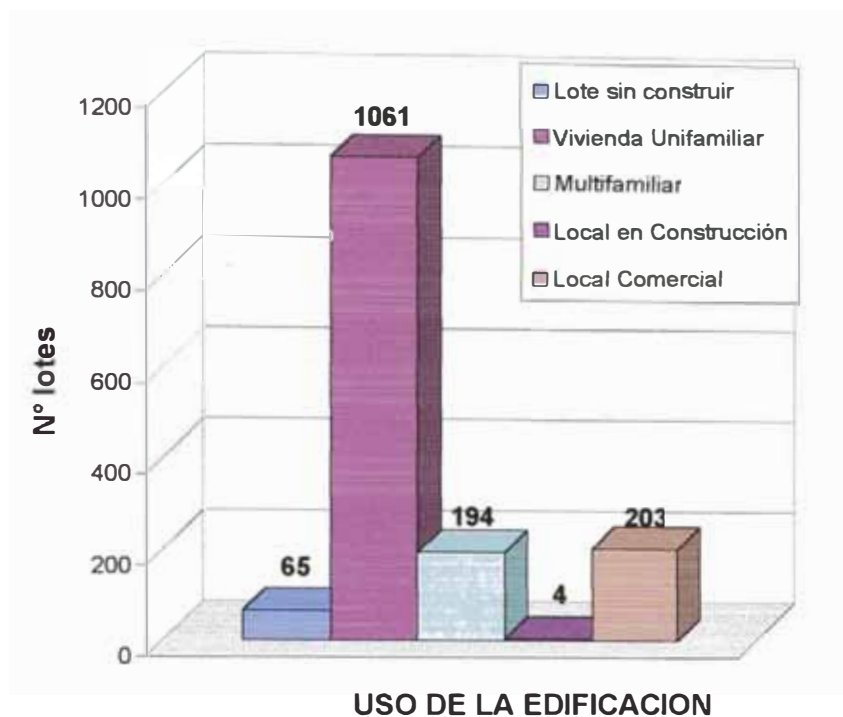


Fig. 5.31 Distribución de lotes de acuerdo al uso de la edificación.

## 5.8 Resumen

En este capítulo se ha explicado los procedimientos utilizados en la obtención, análisis, tratamiento y construcción de la base de datos de los ensayos realizados y recopilados para el presente trabajo, así como de los lotes evaluados utilizando el sistema de información geográfica ARCVIEW, necesarios para la realización del estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Ayacucho.

También se analizó el peligro sísmico y sus efectos colaterales en la ciudad de Ayacucho. 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 y 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 y refracción sísmica realizadas en el proyecto, para finalmente general los planos de amenazas sísmicas para los sismos escenarios.

Se utilizó la información de altimetría para poder así construir la cobertura de la topografía, que sirve para representar la superficie real de la ciudad y realizar cálculos básicos de pendiente, las curvas de nivel, etc. Además esta cobertura sirve como base para la construcción de las coberturas del tipo de suelo y la zonificación sísmica de la ciudad.



## **CAPITULO VI**

### **Evaluación de escenas de daño**

## 6. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE DAÑO

### 6.1 Introducción

Como se observó en los capítulos anteriores, los estudios de riesgo sísmico a nivel urbano requieren de una metodología que permita evaluar la calidad estructural o vulnerabilidad sísmica de los edificios, para poder obtener posibles escenarios de daño como consecuencia de un terremoto. Evidentemente, esto sólo será posible con la disposición de los datos requeridos por la metodología, es decir, la información de los edificios, de las características del suelo en donde se encuentran ubicados y de la peligrosidad sísmica de la zona. Para este trabajo se eligió la metodología del índice de vulnerabilidad que permite evaluar la calidad estructural de los edificios mediante la calificación de 11 parámetros. La base de datos construida en el capítulo anterior, permite en general evaluar la mayoría de los parámetros, sin embargo, al realizar un estudio a nivel urbano en donde se encuentran localizados miles de edificios, la información requerida puede ser muy amplia, ocasionando inevitablemente que algún dato sea muy difícil de obtener y que en algún caso inclusive no exista, para lo cual se puede inferir a partir de estudios estadísticos realizados en trabajos anteriores o generándolo aleatoriamente. Una vez calculada la vulnerabilidad de los edificios se sustituyen en las funciones de vulnerabilidad para obtener los posibles escenarios de daño.

La metodología fue propuesta por Benedetti y Petrini, en 1984, y se modificó ligeramente por Caicedo (1993) y Yépez (1996), para poder aplicarse al tipo de construcciones existente en Barcelona, esto ha permitido aplicarse en diferentes trabajos entre los que se encuentran, el proyecto europeo SERGISAI (1998); o en estudios generales como se muestra en Barbat *et al*, (1996), Mena, (1997) y Mena *et al*, (1999), entre otros.

En este capítulo se procederá a realizar los cálculos de índice de vulnerabilidad, así como se obtendrá los porcentajes de daños producto de diferentes sismos escenarios finalizando en la obtención de un mapa de riesgo sísmico expresado en pérdidas económicas.

## 6.2 Cálculo de índice de vulnerabilidad.

El siguiente paso es el cálculo del índice de vulnerabilidad de los edificios; pero debido a la ausencia de edificaciones de concreto armado en la zona de estudio sólo se realizó la evaluación de edificaciones de mampostería (piedra, adobe, tapial, albañilería y otros).

Este cálculo se realiza conforme a los parámetros anteriormente descritos e implementados en el entorno del Excel; en este proceso se agrega nuevos campos a la base de datos entre los cuales se encuentra los 11 parámetros del índice de vulnerabilidad y el valor correspondiente al índice de daño para las diferentes intensidades.

Para los cálculos del índice de vulnerabilidad se utilizó la expresión 3.2 y la tabla 3.1 anteriormente descrita:

$$I_v = \sum_{j=1}^{11} K_j \cdot W_j$$

<i>i</i>	Parámetro	$K_{i,A}$	$K_{i,B}$	$K_{i,C}$	$K_{i,D}$	$W_i$
1	Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.0
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3	Resistencia convencional	0	5	25	45	1.5
4	Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75
5	Diáfragmas horizontales	0	5	15	45	1.0
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1.0
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1.0
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1.0

A continuación se procederá a detallar los resultados obtenidos calificando a la clase a la cual pertenecen dichos lotes en cada uno de los 11 parámetros de acuerdo a la base de datos procesada en el área de estudio:

### Parámetro 1: Tipo y Organización del sistema resistente

De la tabla 6.1 se puede observar que el 35.1% de las construcciones cumplen con los requisitos de contar con un buen sistema resistente, observando que la mayor cantidad de edificaciones son las de albañilería; pues por el contrario el 60% de los lotes no cuentan con un buen sistema resistente, observando que casi la totalidad de construcciones de adobe se encuentran dentro de este porcentaje.

Además se puede notar que la clase con mayor porcentaje es la D (55.86%), estando las construcciones de albañilería y adobe en similares porcentajes.



Clases	N° LOTES	%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	103	6.75%	103	6.75%	0	0.00%
B	433	28.36%	429	28.09%	4	0.26%
C	63	4.13%	55	3.60%	8	0.52%
D	853	55.86%	403	26.39%	450	29.47%
0	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

tabla 6.1 Distribución de resultados del parámetro 1



Figura 6.1: Albañilería sin ningún arriostramiento ni confinamiento de muros



Figura 6.2: Albañilería con columnas pero sin vigas de confinamiento

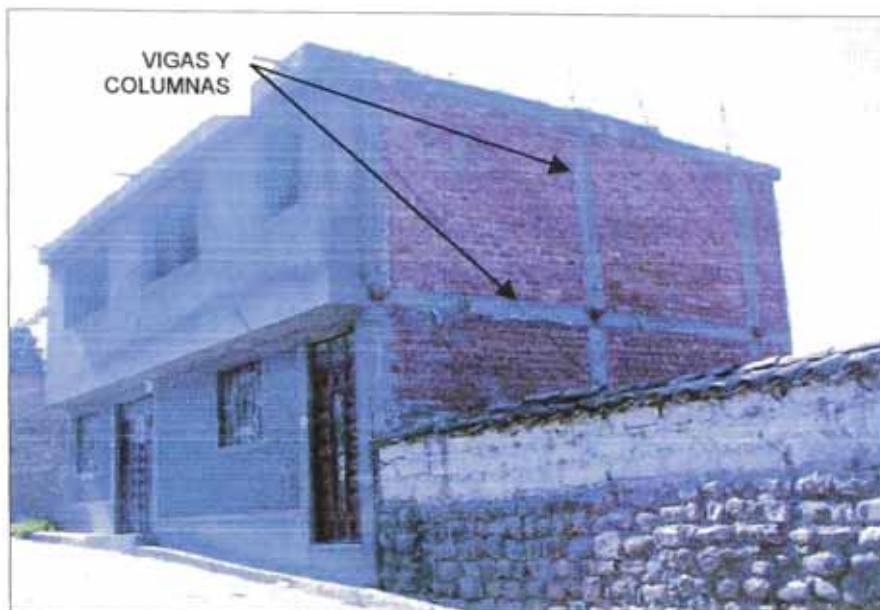


Figura 6.3: Albañilería bien confinada

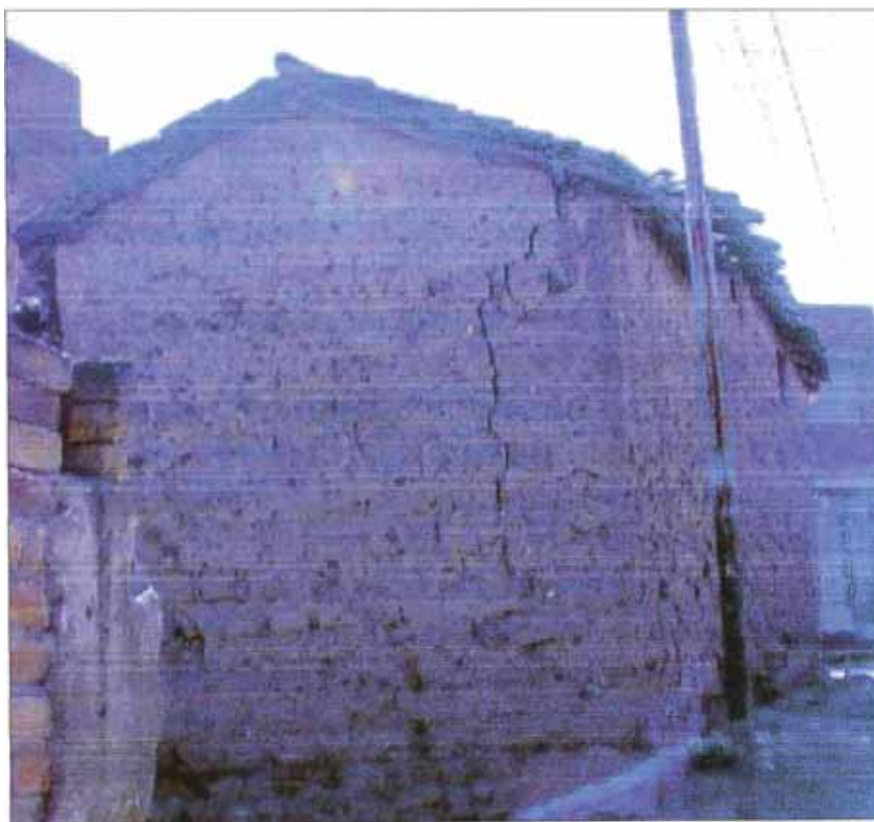


Figura 6.4: Mampostería de adobe sin arriostamiento horizontal y vertical.



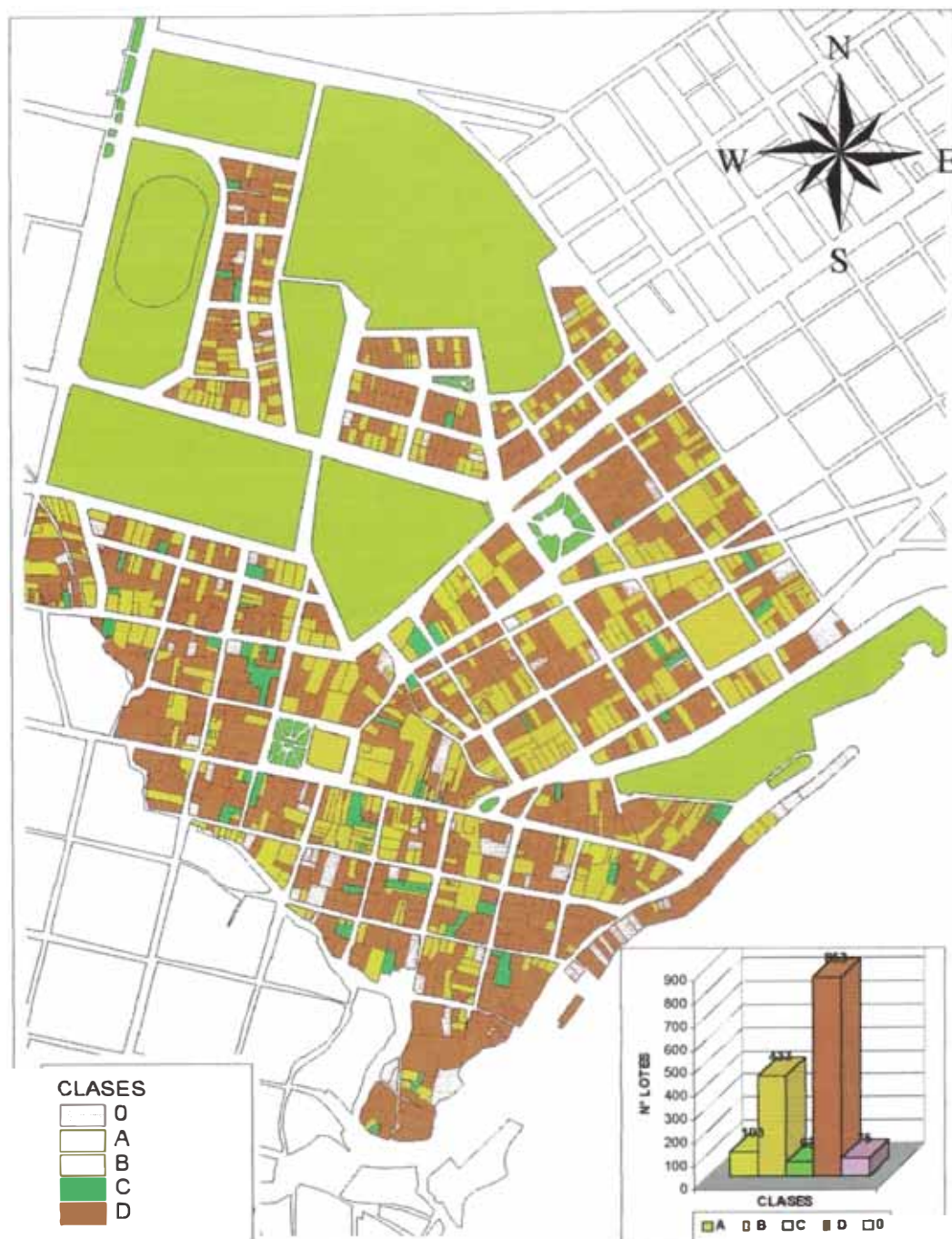


Figura 6.5: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 1

### Parámetro 2: Calidad del sistema resistente

De acuerdo a lo observado en la tabla 6.2, el 73.68% de las edificaciones evaluadas, no cumplen con ninguno o algunos de los requisitos que exige este parámetro; esto se debe a que en la zona no hay un buen control en la fabricación de las unidades de mampostería, así como en la construcción de su sistema resistente.

También se puede notar que la totalidad de construcciones de adobe no cumplen con los requisitos que recomienda el reglamento nacional de construcciones.

Clases		%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	57	3.73%	57	3.73%	0	0.00%
B	270	17.68%	269	17.62%	1	0.07%
C	464	30.39%	457	29.93%	7	0.46%
D	661	43.29%	207	13.56%	454	29.73%
O	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

tabla 6.2 Distribución de resultados del parámetro 2



Figura 6.6: Mortero de mala calidad, con juntas irregulares.

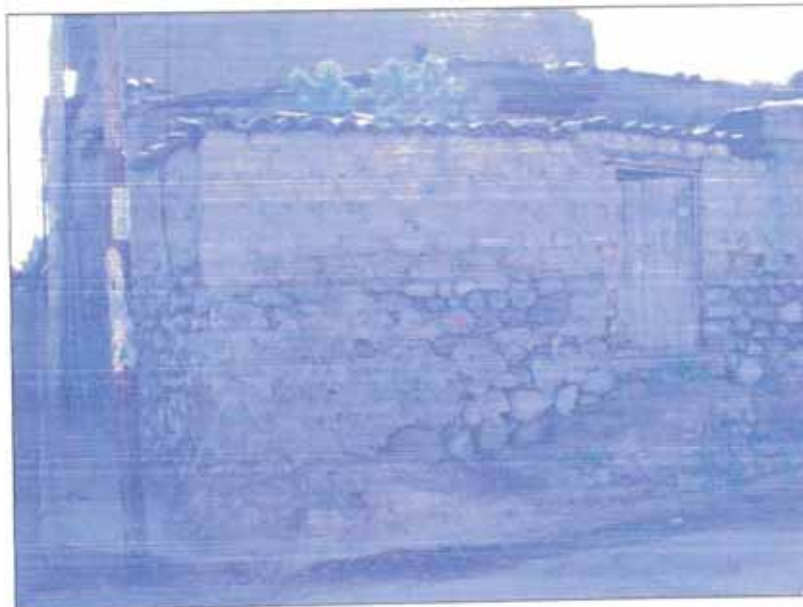


Figura 6.7: Mampostería de adobe y piedra no homogénea



Figura 6.8: Mampostería con una buena calidad de su sistema resistente.



Figura 6.9: Mampostería de piedra.



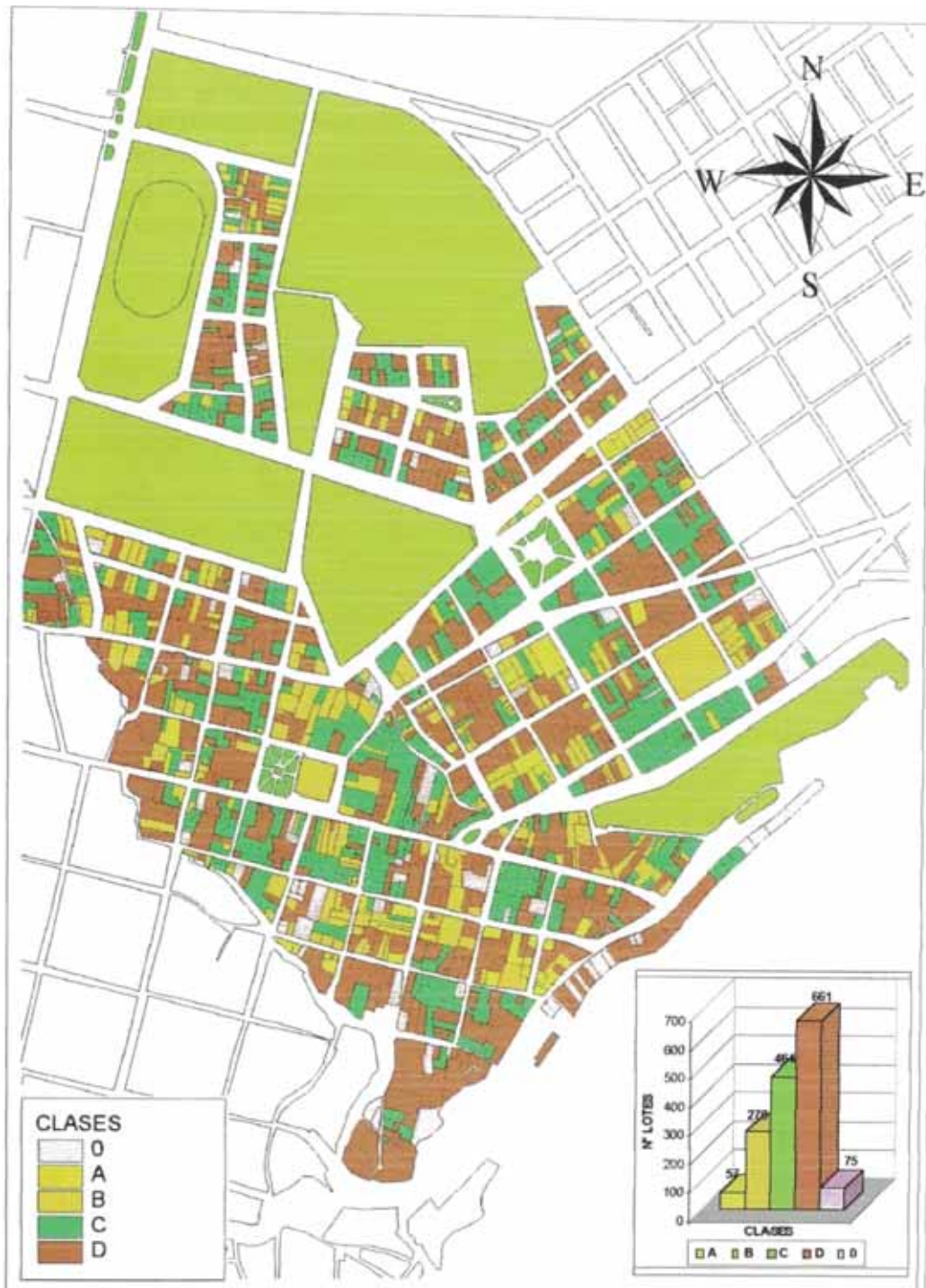


Figura 6.10: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 2

### Parámetro 3: Resistencia convencional

De acuerdo a la tabla 6.3, la gran cantidad de edificaciones tiene una buena resistencia a las fuerzas horizontales, esto debido a que las construcciones de la zona cuentan con gran cantidad de muros resistentes.

En el caso de construcciones de adobe se puede adicionar el gran espesor de sus muros.

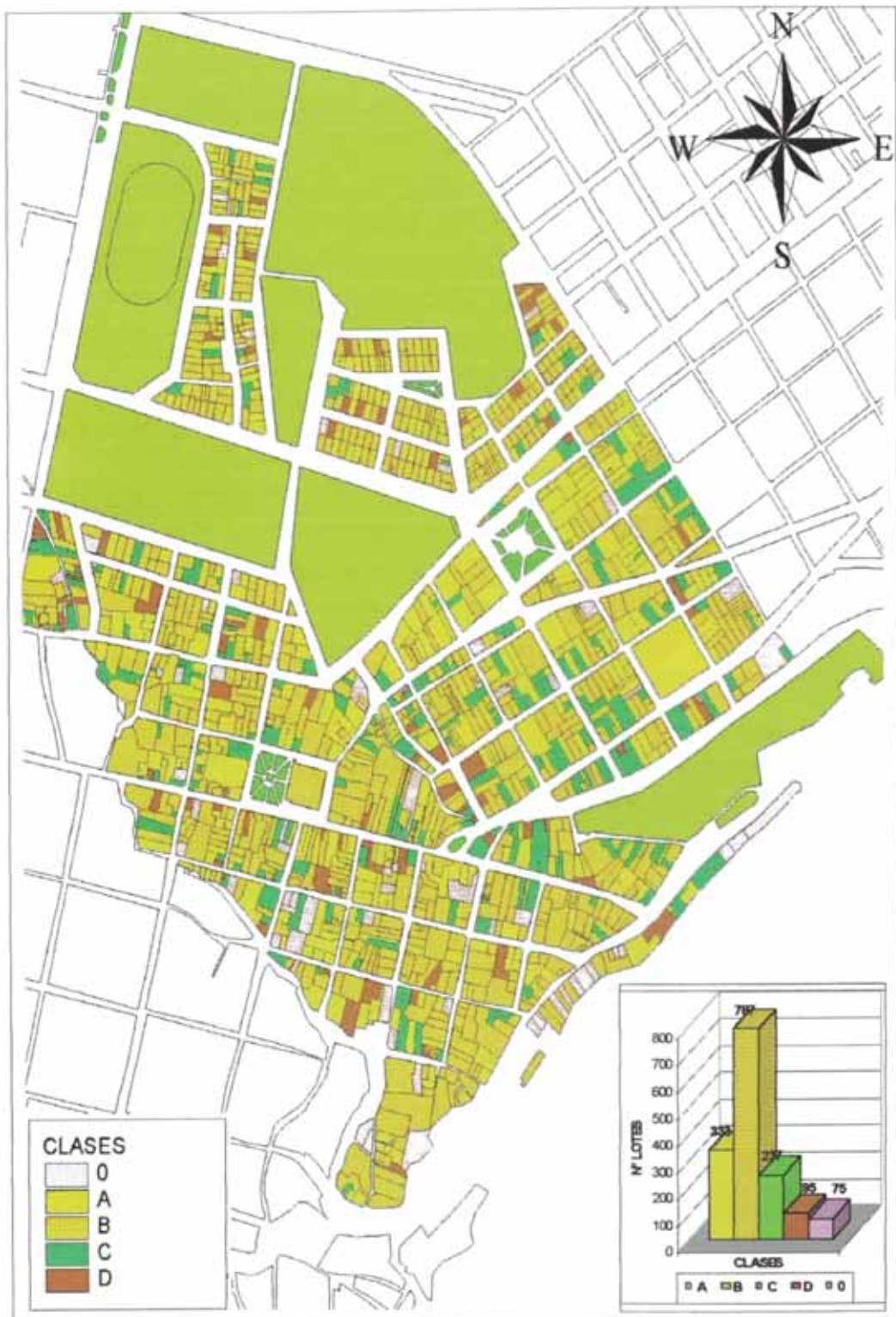


Figura 6.11: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 3

Clases		%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	333	21.81%	275	18.01%	58	3.80%
B	787	51.54%	459	30.06%	328	21.48%
C	237	15.52%	212	13.88%	25	1.64%
D	95	6.22%	44	2.88%	51	3.34%
0	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

tabla 6.3 Distribución de resultados del parámetro 3



**Parámetro 4: Posición del edificio y de la cimentación**

De acuerdo a la tabla 6.4, la gran mayoría de edificaciones se encuentran emplazadas en terrenos de regular capacidad portante y con pendientes suaves; observándose también que el 10.28% se encuentran sobre fuertes pendientes, además de no contar con una adecuada asesoría técnica, esto generalmente se puede observar en aquellas que están localizadas al margen de las quebradas y lechos de huaycos.



Figura 6.12: Vivienda emplazada sobre grandes pendientes.



Figura 6.13: Viviendas emplazada sobre grandes pendientes.



Figura 6.14: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 4

Clases	cantidad	%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	411	26.92%	407	26.65%	4	0.26%
B	52	3.41%	52	3.41%	0	0.00%
C	832	54.49%	446	29.21%	386	25.28%
D	157	10.28%	85	5.57%	72	4.72%
O	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

tabla 6.4 Distribución de resultados del parámetro 4

### Parámetro 5: Diafragmas horizontales

De acuerdo a la tabla 6.5, el 54.62% de los lotes analizados cuentan con un adecuado diafragma horizontal, el cual proporcionará un comportamiento en conjunto con todo el sistema resistente; el 34.58% son aquellas que no tienen un comportamiento de diafragma horizontal rígido, haciendo que sus sistemas resistentes tenga un comportamiento individual a los forjados.



Figura 6.15: Vivienda de dos pisos sin diafragma rígido visible.

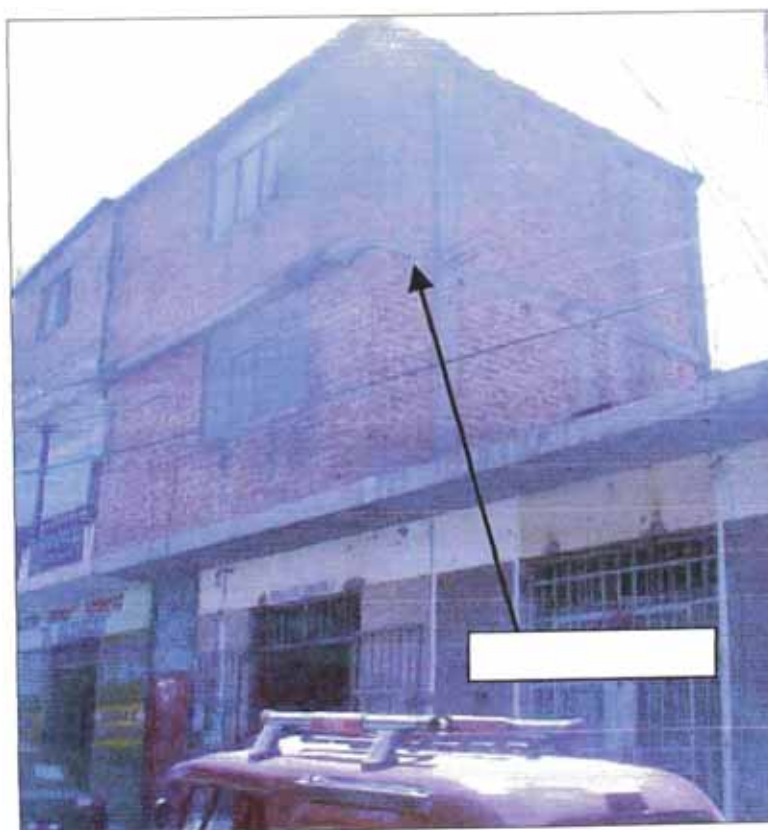


Figura 6.16: Vivienda con diafragma rígido visible.



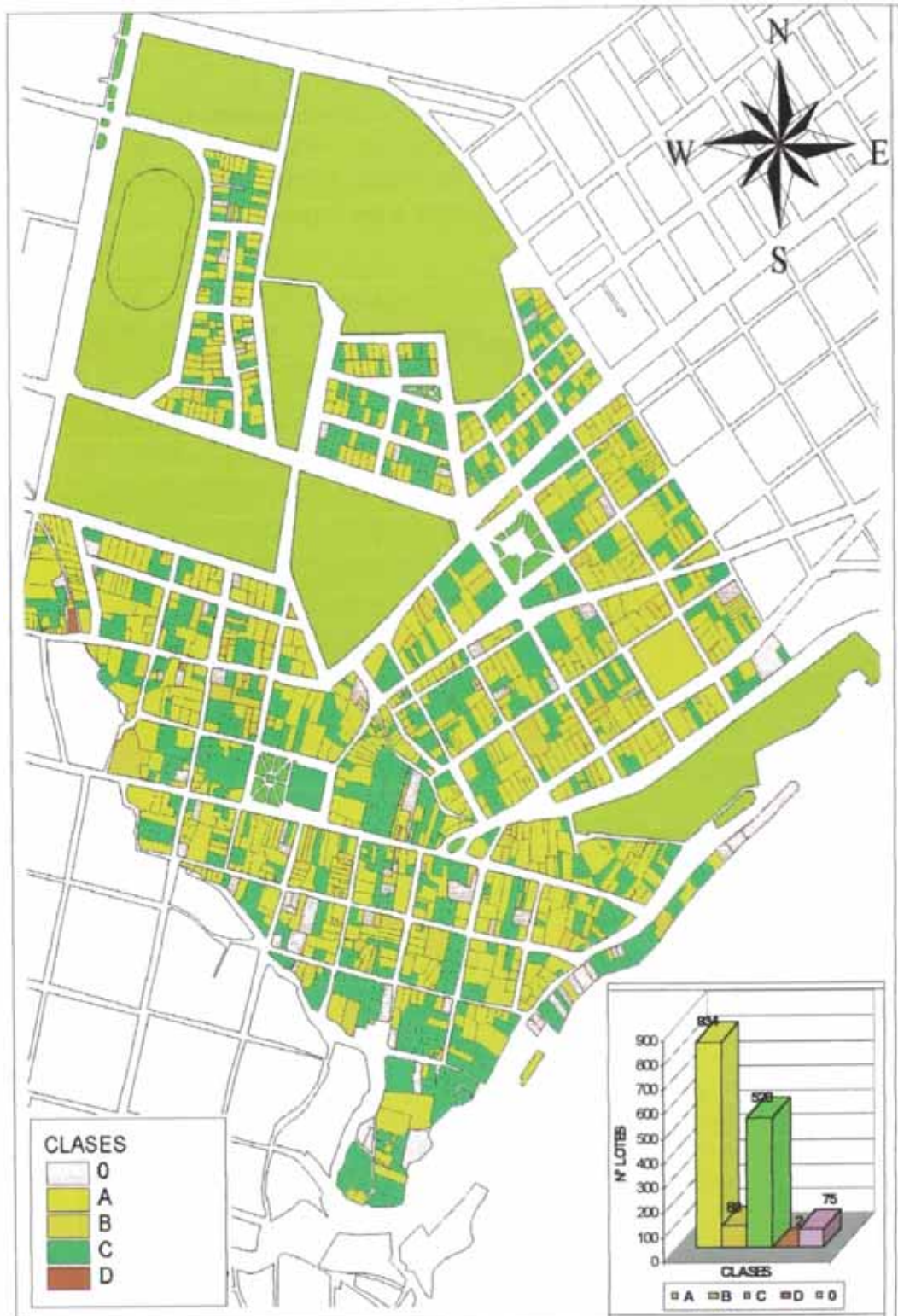


Figura 6.17: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 5

Clases	cantidad	%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	834	54.62%	600	39.29%	234	15.32%
B	88	5.76%	63	4.13%	25	1.64%
C	528	34.58%	325	21.28%	203	13.29%
D	2	0.13%	2	0.13%	0	0.00%
O	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

tabla 6.5 Distribución de resultados del parámetro 5

### Parámetro 6: Configuración en planta

Para la evaluación de este parámetro se tuvo que recurrir al catastro urbano digitalizado de las áreas construidas de cada lote y fueron corroboradas por las vistas aerofotográficas. De acuerdo a la tabla 6.6, se pudo observar que casi la totalidad de viviendas de mampostería tienen una buena configuración en planta, haciendo que la estructura tenga un buen comportamiento sísmico.

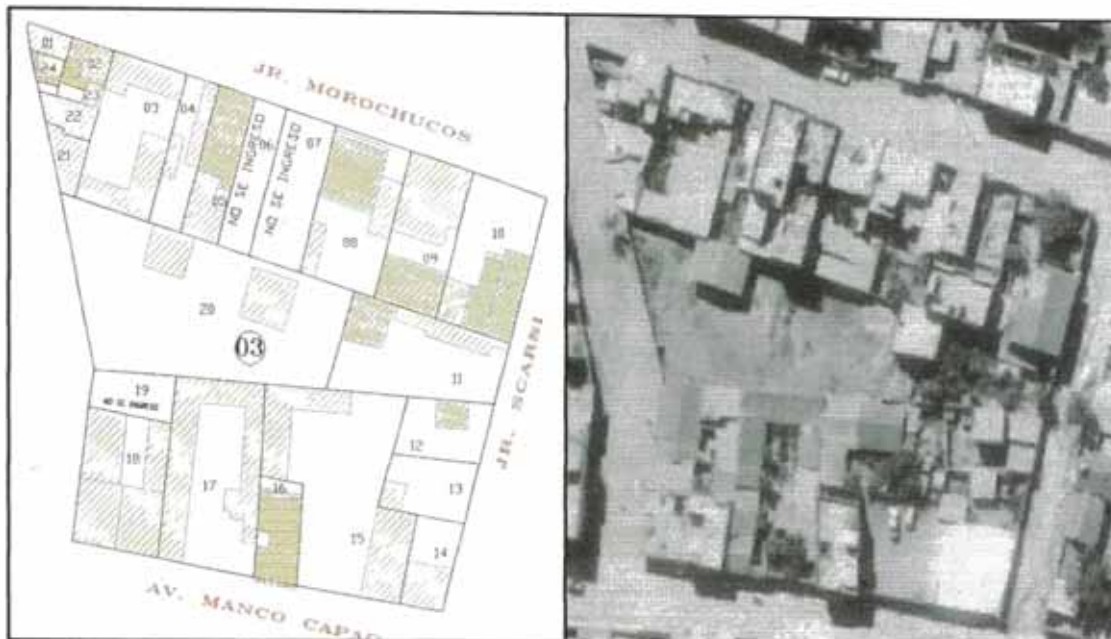


Figura 6.18: Planos digitalizados y vistas aerofotográficas, usados para la evaluación del parámetro 6.

Clases	cantidad	%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	1011	66.21%	771	50.49%	240	15.72%
B	291	19.06%	186	12.18%	105	6.88%
C	79	5.17%	25	1.64%	54	3.54%
D	71	4.65%	8	0.52%	63	4.13%
O	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

tabla 6.6 Distribución de resultados del parámetro 6

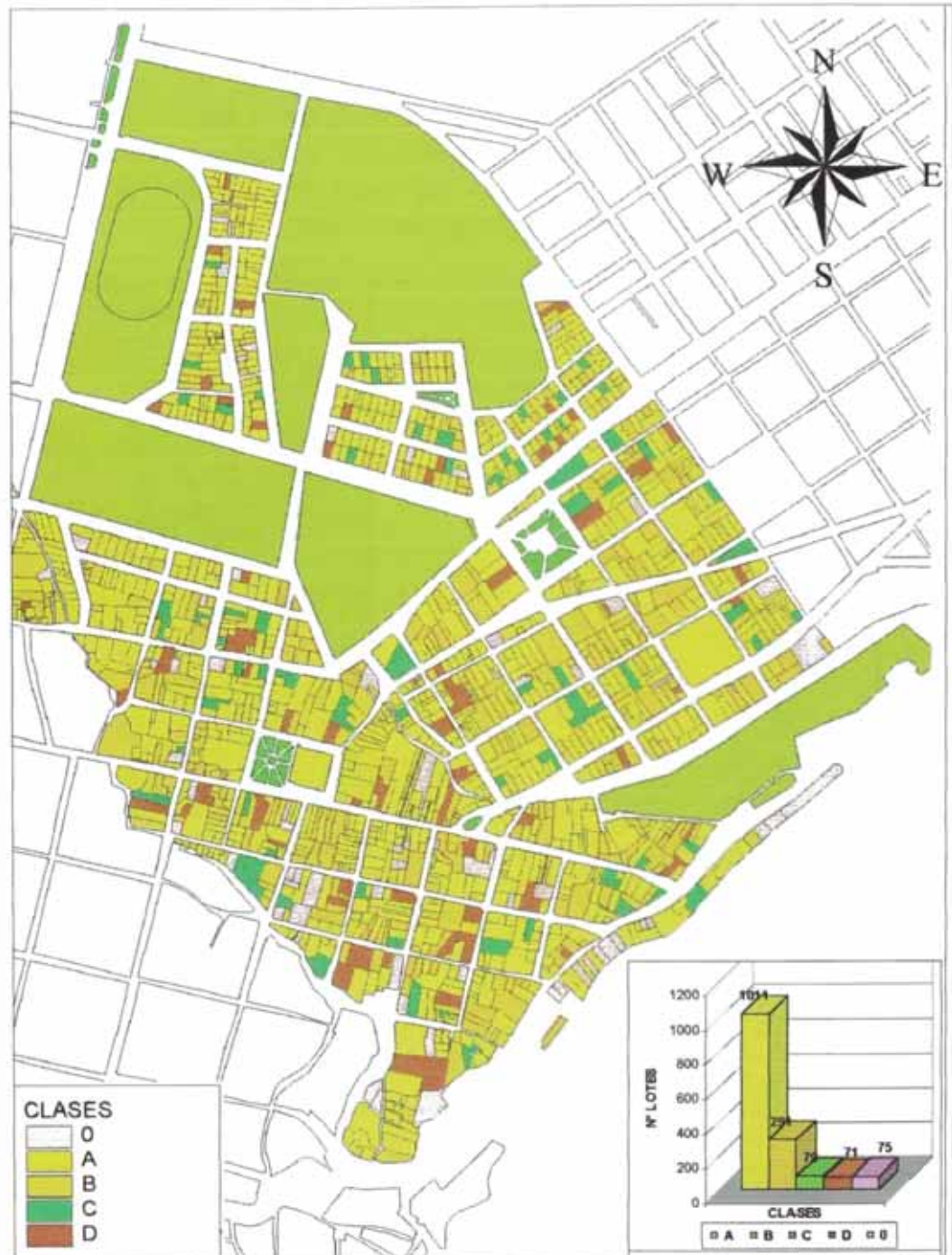


Figura 6.19: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 6

### Parámetro 7: Configuración en elevación

De acuerdo a la tabla 6.7, solo casi el 12% de las construcciones son irregulares en elevación, haciendo ver que en la región las construcciones son más estables y resistentes a eventos sísmicos en cuanto a su configuración en elevación.





Figura 6.20: Discontinuidad de masas en los entrepisos.

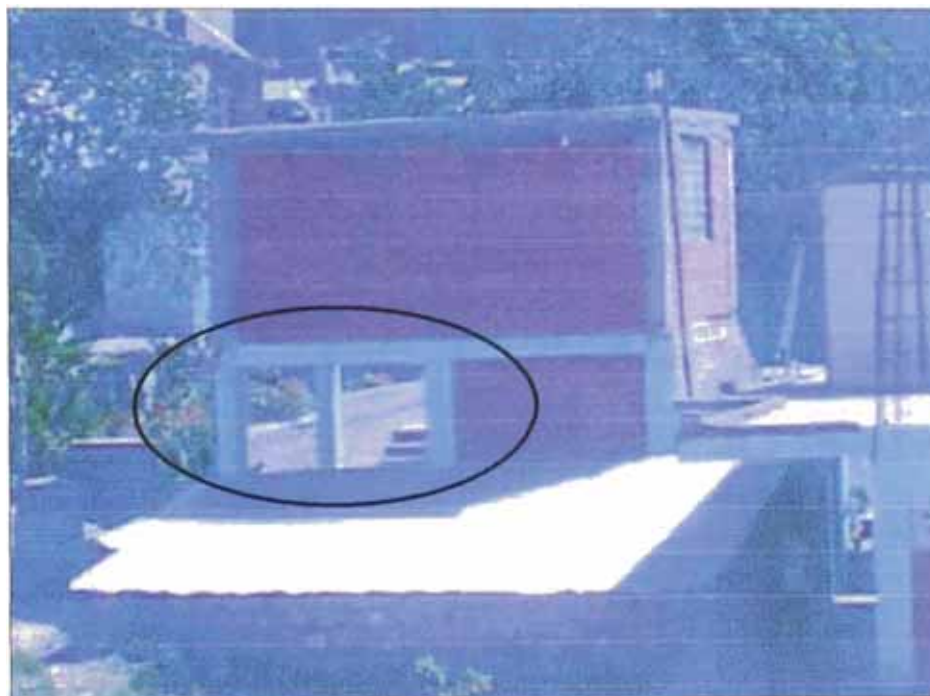


Figura 6.21: Piso blando en el primer nivel.

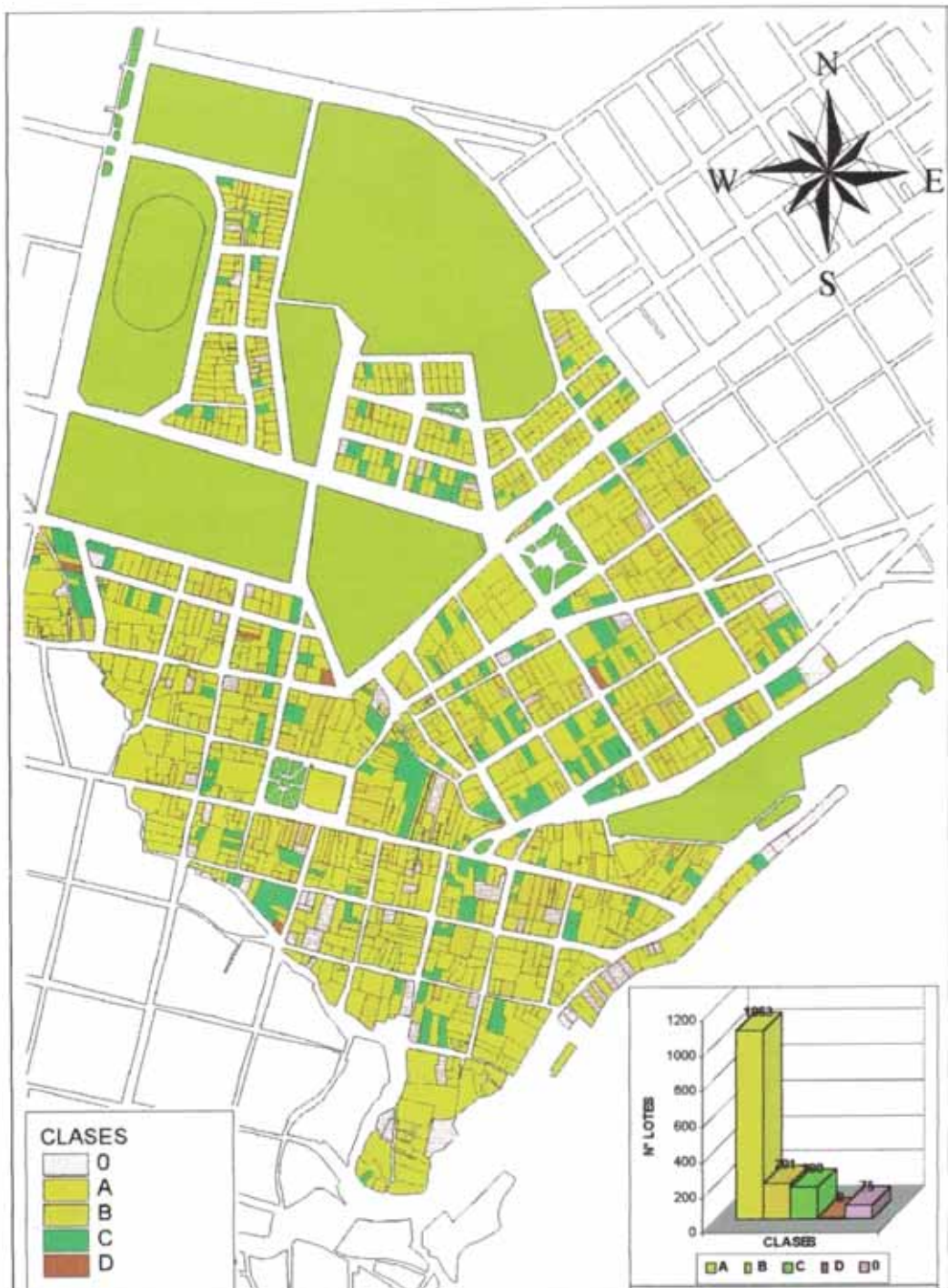


Figura 6.22: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 7

Clases	cantidad	%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	1063	69.61%	608	39.82%	455	29.80%
B	201	13.16%	201	13.16%	0	0.00%
C	180	11.79%	174	11.39%	6	0.39%
D	8	0.52%	7	0.46%	1	0.07%
0	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

tabla 6.7 Distribución de resultados del parámetro 7



**Parámetro 8: Distancia máxima entre los muros**

De acuerdo a la tabla 6.8, casi la mitad de las construcciones evaluadas no presentan espaciamientos aceptables de sus muros, que de una u otra manera alterarán la vulnerabilidad sísmica del edificio; este es un típico efecto de las ampliaciones y remodelaciones arquitectónicas que se realizan en las construcciones existentes; así como también se pudo observar que cuanto mayor el área de la edificación, los espaciamientos de sus ambientes también eran mayores.

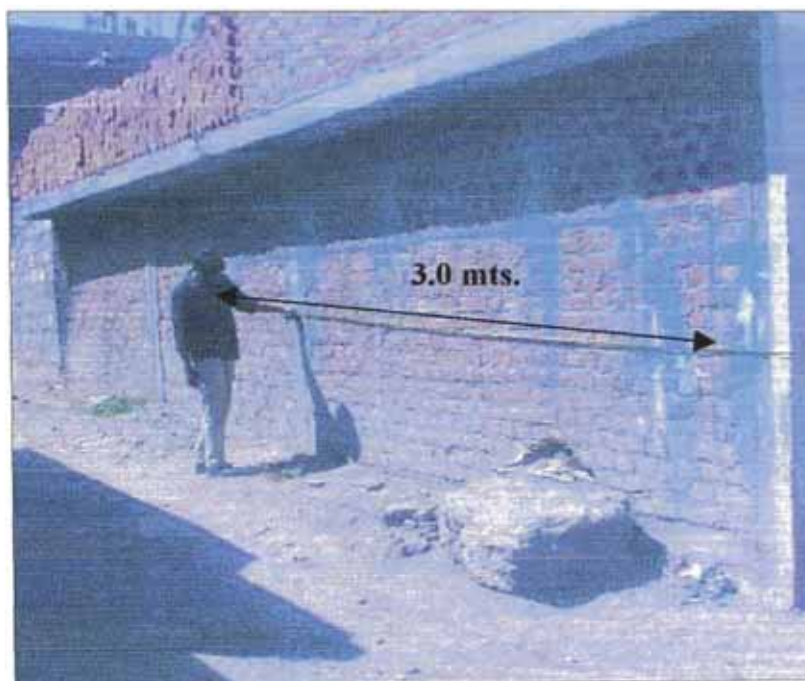


Figura 6.23: Distancia entre muros.



Figura 6.24: Separación máxima entre muros

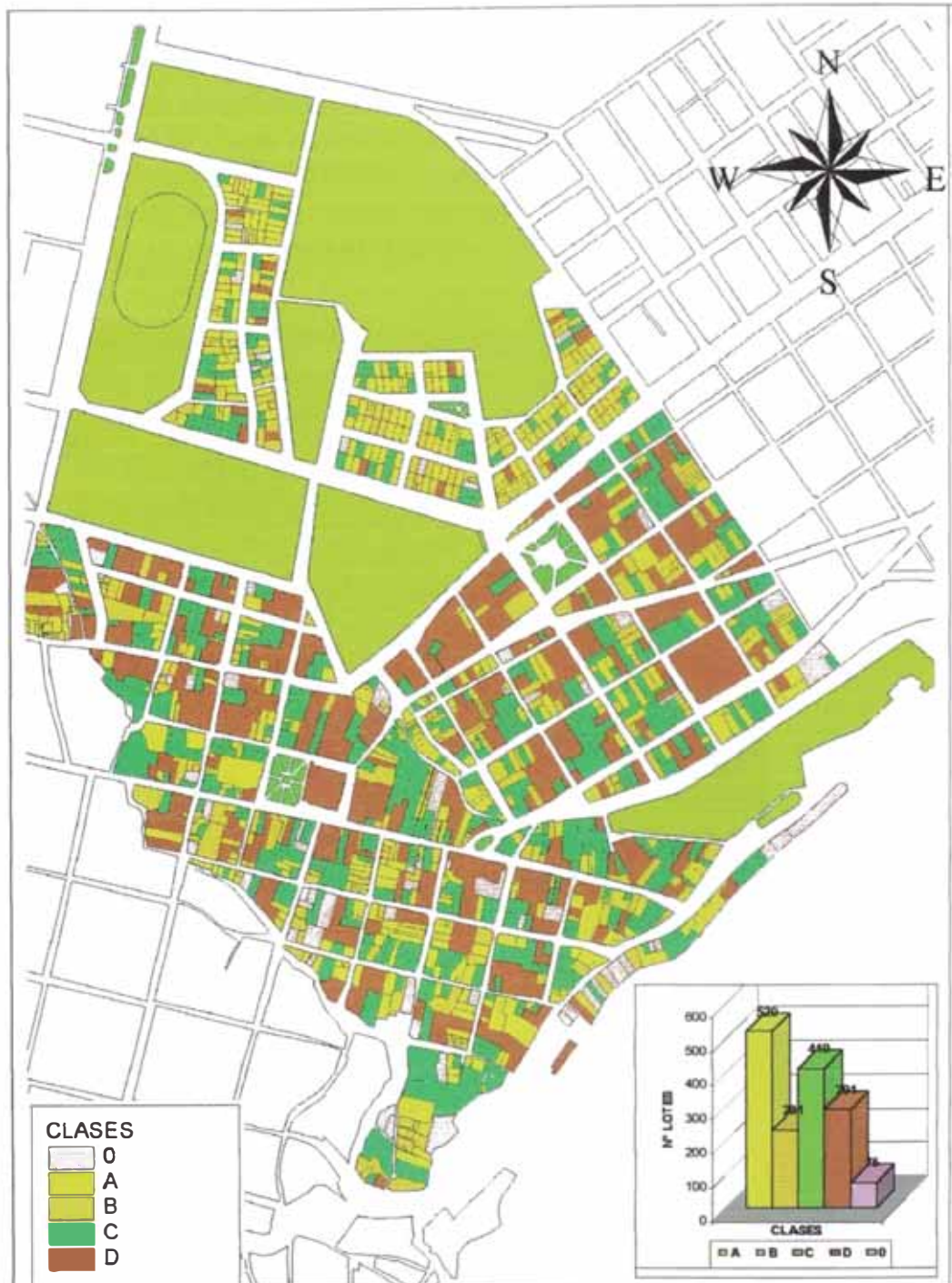


Figura 6.25: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 8

Clases	cantidad	%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	520	34.05%	335	21.94%	185	12.12%
B	231	15.13%	161	10.54%	70	4.58%
C	410	26.85%	289	18.93%	121	7.92%
D	291	19.06%	205	13.43%	86	5.63%
O	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

Tabla 6.8 Distribución de resultados del parámetro 8



**Parámetro 9: Tipo de cubierta**

De acuerdo a la tabla 6.9, el 60.44% de los lotes tienen coberturas estables, observándose además la no-existencia de cubiertas en la mayoría de lotes, sino por el contrario un diafragma rígido de concreto armado en el último nivel haciendo las construcciones más estables, esto principalmente en construcciones de albañilería.

Por el contrario se pudo notar que en la mayoría de construcciones de adobe, tapial y piedra, el tipo de cubierta estaba constituida por listones de maderas con cobertura de tejas y barro, sin buenas conexiones.



Figura 6.26: Cubierta de teja para una construcción de albañilería.



Figura 6.27: Cubierta de calamina para una construcción de adobe.



Figura 6.28: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 9

Clases	cantidad	%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	698	45.71%	667	43.68%	31	2.03%
B	225	14.73%	221	14.47%	4	0.26%
C	263	17.22%	83	5.44%	180	11.79%
D	266	17.42%	19	1.24%	247	16.18%
0	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

Tabla 6.9 Distribución de resultados del parámetro 9



### Parámetro 10. Elementos no estructurales

De acuerdo a la tabla 6.10, demuestra la existencia de pequeños elementos no estructurales, que no afectarán el esquema estructural resistente de la edificación, pero que en casos de eventos sísmicos podrían provocar daños secundarios.

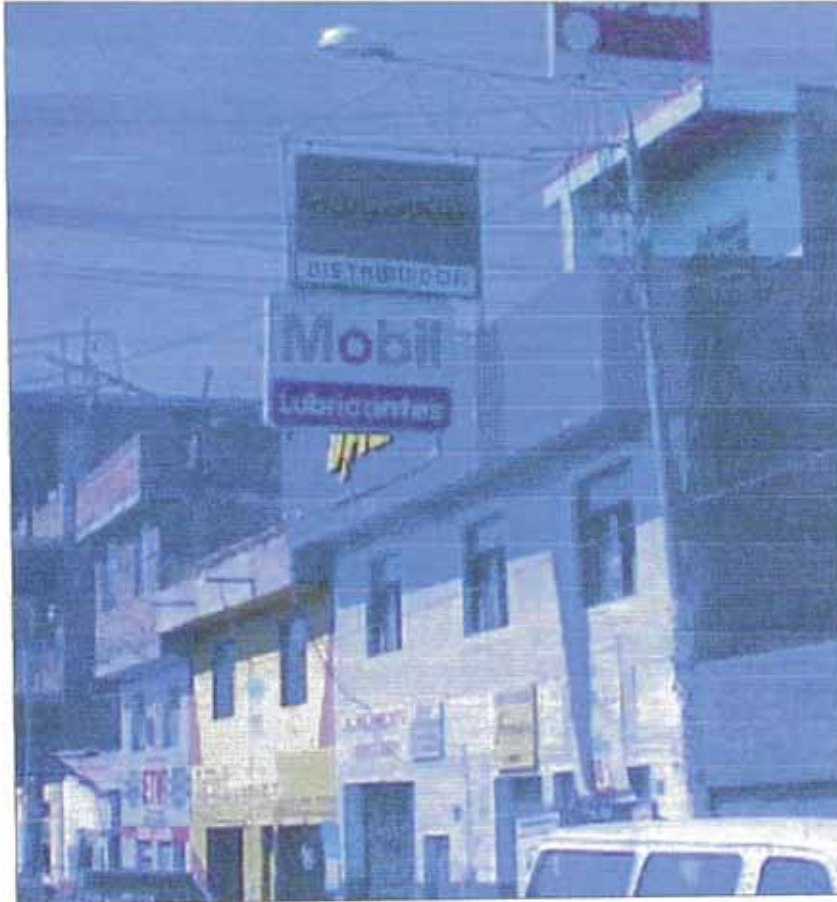


Figura 6.29: Carteles publicitarios en uno de los lotes.



Figura 6.30: Antena parabólica sobre una edificación



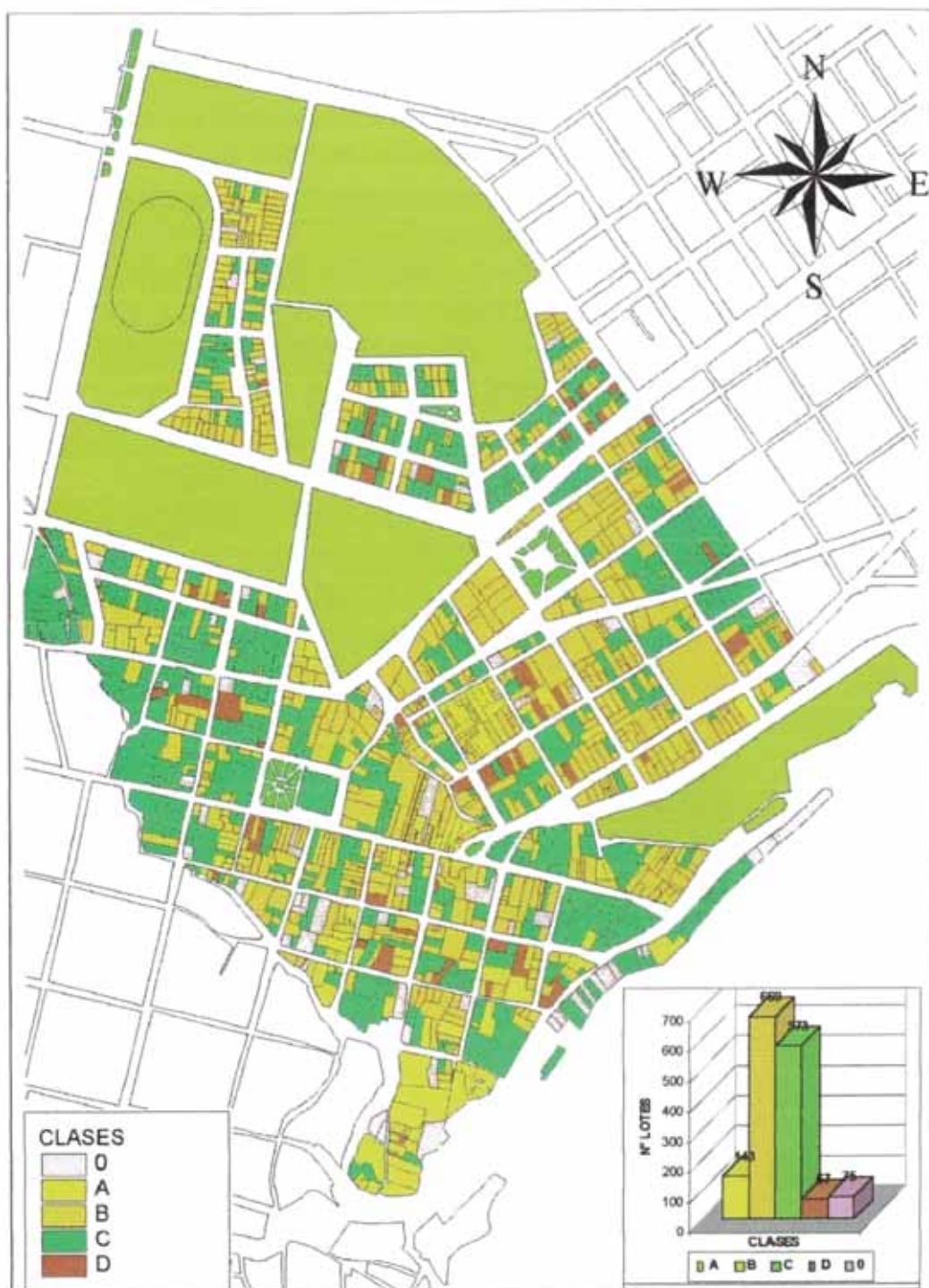


Figura 6.31: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 10

Clases	cantidad	%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	143	9.36%	38	2.49%	105	6.88%
B	669	43.81%	614	40.21%	55	3.60%
C	573	37.52%	277	18.14%	296	19.38%
D	67	4.39%	61	3.99%	6	0.39%
O	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

Tabla 6.10 Distribución de resultados del parámetro 10

**Parámetro 11. Estado de conservación**

De acuerdo a la tabla 6.11, casi la mitad de las construcciones están mal conservadas, por la falta de un adecuado mantenimiento o en otros casos haber atravesado un evento sísmico; mientras que el 38.31% no tienen daño alguno o están bien conservados.



Figura 6.32: Construcción de adobe en mal estado de conservación.



Figura 6.33: Construcción de albañilería en buenas condiciones.

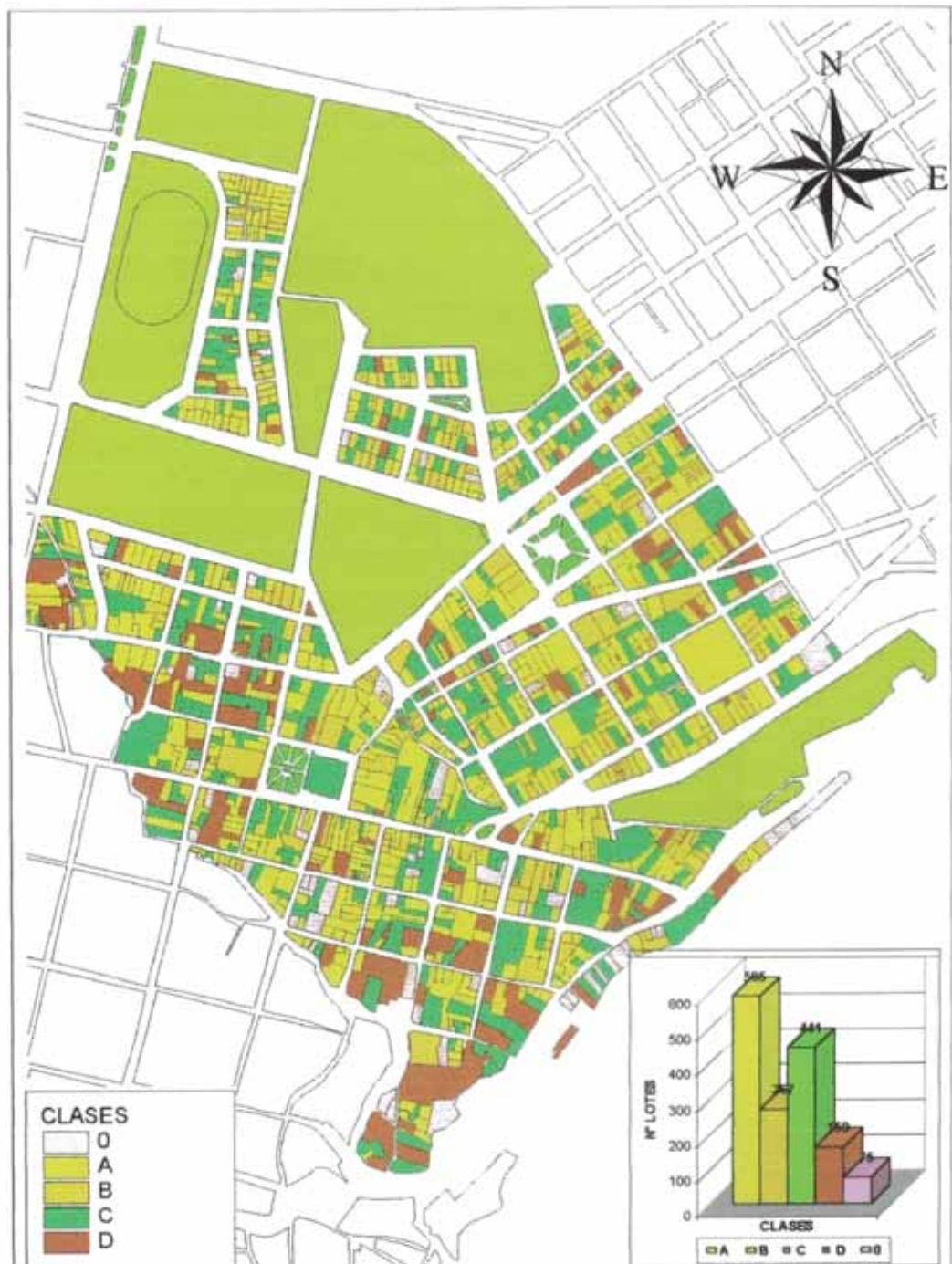


Figura 6.34: Distribución de clases en la zona de estudio para el parámetro 11

Clases	cantidad	%	Albañilería	%	Adobe, tapial y Piedra	%
A	585	38.31%	574	37.59%	11	0.72%
B	267	17.49%	188	12.31%	79	5.17%
C	441	28.88%	197	12.90%	244	15.98%
D	159	10.41%	31	2.03%	128	8.38%
O	75	4.91%	0	0.00%	0	0.00%
total	1527	100.00%	990	64.83%	462	30.26%

Tabla 6.11 Distribución de resultados del parámetro 11



Una vez calificado el parámetro en cada lote, lo que sigue es hallar el índice de vulnerabilidad de cada uno de ellos, para lo cual se aplicará la fórmula 3.2 conjuntamente con la tabla 3.1 que engloba la ponderación de cada parámetro de acuerdo a su clase (A, B, C, D).

Con estos resultados el siguiente paso es decidir la forma en la que se mostrarán los valores, para poder describir correctamente los efectos que un sismo puede causar en la zona de estudio. Como se definió anteriormente las unidades consideradas para construir las coberturas de los edificios son los lotes y manzanas. Cada unidad de estudio tiene una utilidad diferente dependiendo de las necesidades que se persigan, y sobre todo de la forma en que se quieran presentar.

Esas diferencias se mostrarán en nuestra zona de estudio, en donde se utilizará inicialmente como unidad los lotes, los cuales nos permitirán presentar en una forma detallada los resultados del estudio de vulnerabilidad; aunque no sea la forma más conveniente, ya que al realizar un estudio a nivel urbano el número de edificios puede ser muy grande, lo que puede provocar que su visualización se complique. No obstante la razón principal de este inconveniente, es que los resultados se deben analizar dentro de un contexto estadístico por región y no como un resultado único del edificio, por lo tanto considerar unidades como las manzanas permitiría observar mejor los resultados.

Una vez evaluado el índice de vulnerabilidad para cada edificio, se utilizan los siguientes 5 grupos para clasificarlos de acuerdo al valor obtenido tal como se puede observar en la tabla 6.12; el rango de estos grupos puede variar dependiendo del detalle que se pretende en el estudio. Así también para poder interpretar mejor los resultados que se tienen en el presente estudio se definieron los siguientes rangos de vulnerabilidad:

- VULNERABILIDAD < 20%: BAJA
- $20\% \leq$  VULNERABILIDAD < 40%: MEDIA
- VULNERABILIDAD  $\geq$  40%: ALTA

En este estudio se evaluaron 1527 lotes de los cuales el 35.03 % se encuentra con un índice de vulnerabilidad entre 0 a 20, el 36.87 % se encuentra entre 20 a 40, observándose que dentro de estos dos grupos se tienen a la mayoría de los edificios evaluados que representan una vulnerabilidad baja a media; restando el 28.1% de las edificaciones con una vulnerabilidad alta como consecuencia entre otros motivos a la falta del uso de una normativa sismorresistente, a su antigüedad, y otros factores.

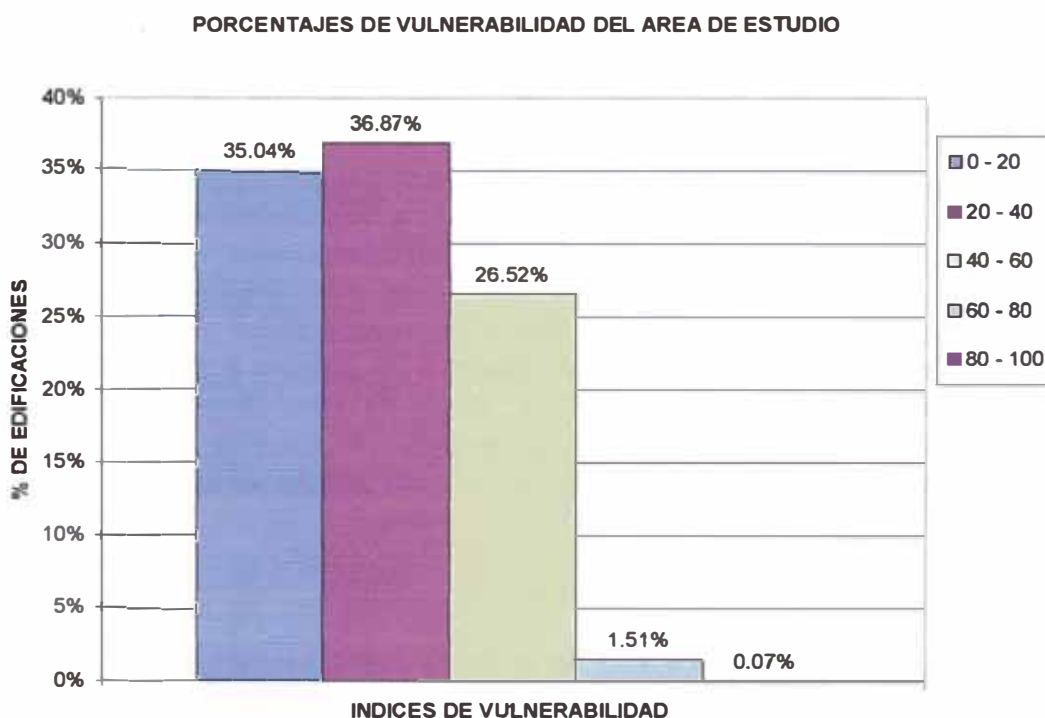
Las estadísticas a demás nos muestran que las edificaciones de albañilería tienen una vulnerabilidad de media a baja en su mayoría, mientras que en las de adobe, tapial y piedra tienen una vulnerabilidad de media a alta.

En la lámina 19 se muestra también una distribución de la vulnerabilidad sísmica a nivel de manzanas, los cuales son el resultado de una media de los lotes existentes dentro de estas, lo cual nos permitirá identificar y analizar mejor la vulnerabilidad de la zona de estudio. También se muestra algunos edificios esenciales (mercados, colegios, Institutos, iglesias y otros), para los cuales no se ha calculado la vulnerabilidad, por lo menos en esta etapa ya que requiere de un estudio más

detallado. Sin embargo, la ubicación de estos edificios puede servir para realizar un mejor análisis del riesgo sísmico.

INDICE DE VULNERABILIDAD	ALBAÑILERIA		ADOBE, TAPIAL, PIEDRA		OTROS		TOTAL
	N°	%	N°	%	N°	%	
0 - 20	460	30.12%	0	0.00%	75	4.91%	535
20 - 40	446	29.21%	117	7.66%	0	0.00%	563
40 - 60	82	5.37%	323	21.15%	0	0.00%	405
60 - 80	1	0.07%	22	1.44%	0	0.00%	23
80 - 100	0	0.00%	1	0.07%	0	0.00%	1
<b>TOTAL</b>	<b>989</b>	<b>64.77%</b>	<b>463</b>	<b>30.32%</b>	<b>75</b>	<b>4.91%</b>	<b>1527</b>

Tabla 6.12 Resultados del índice de vulnerabilidad para los edificios.



Porcentaje de edificaciones con el grado de índice de vulnerabilidad normalizado.

### 6.3 Cálculo de Índice de daño.

Tal como se comentó en capítulos anteriores el riesgo sísmico depende de la vulnerabilidad sísmica de los edificios, la peligrosidad sísmica y los efectos locales del lugar, por lo que a pesar de observar una vulnerabilidad sísmica en algunos edificios de mediana a alta, esto no es preocupante mientras no ocurra un terremoto. En este caso, este tipo de estudios permite observar los efectos que puede provocar un terremoto, mediante los mapas de escenarios de daño como se mostrará a continuación.

Para estimar el daño estructural se construyeron funciones de vulnerabilidad para las tipologías existentes en la zona de estudio, que relacionan el Índice de vulnerabilidad (IV) con el Índice de daño condicionado sobre las aceleraciones horizontales del suelo debido a un sismo propuesto.



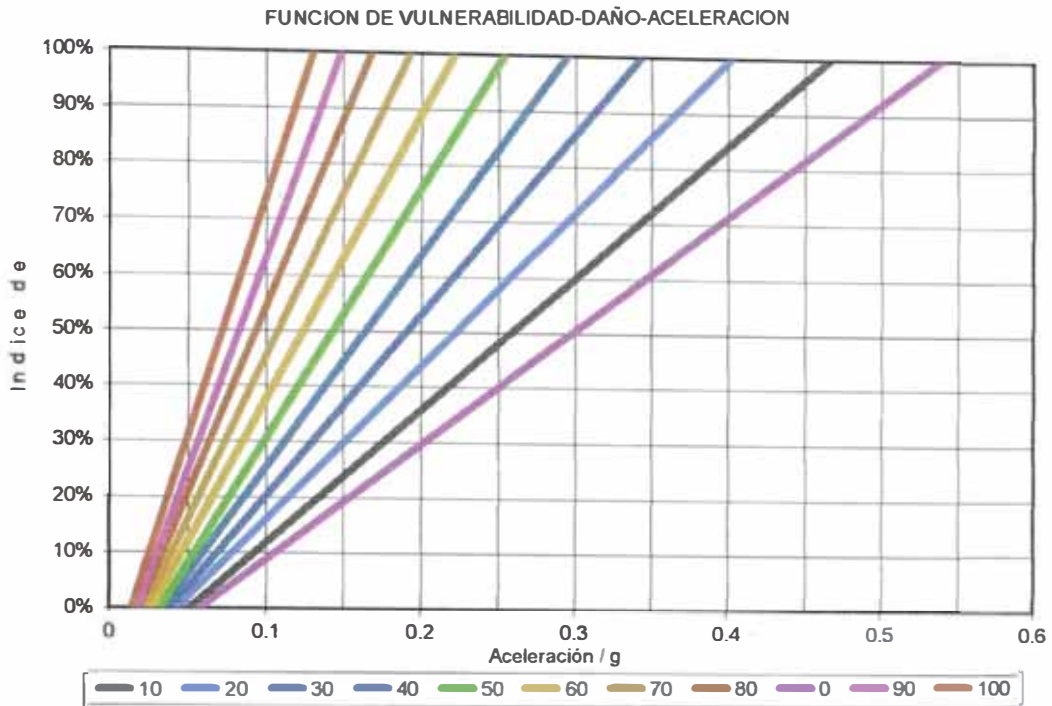


Figura 6.35 A: Funciones de vulnerabilidad-daño-aceleración para estructuras de mampostería sin refuerzo, adobe y tapial.

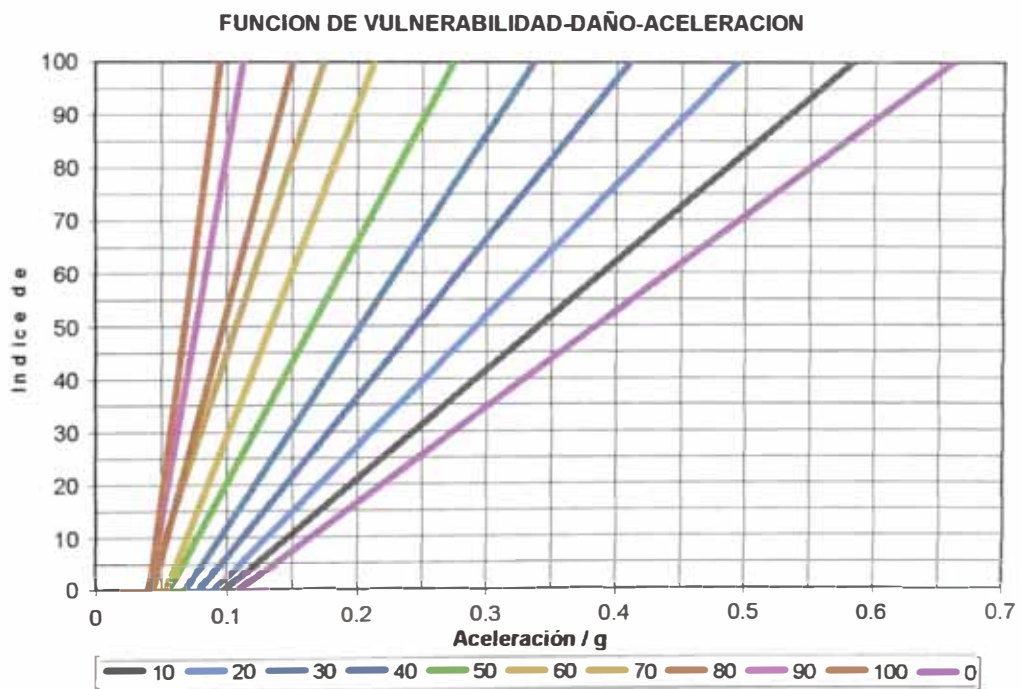


Figura 6.35 B: Funciones de vulnerabilidad-daño-aceleración para construcciones informales en albañilería.

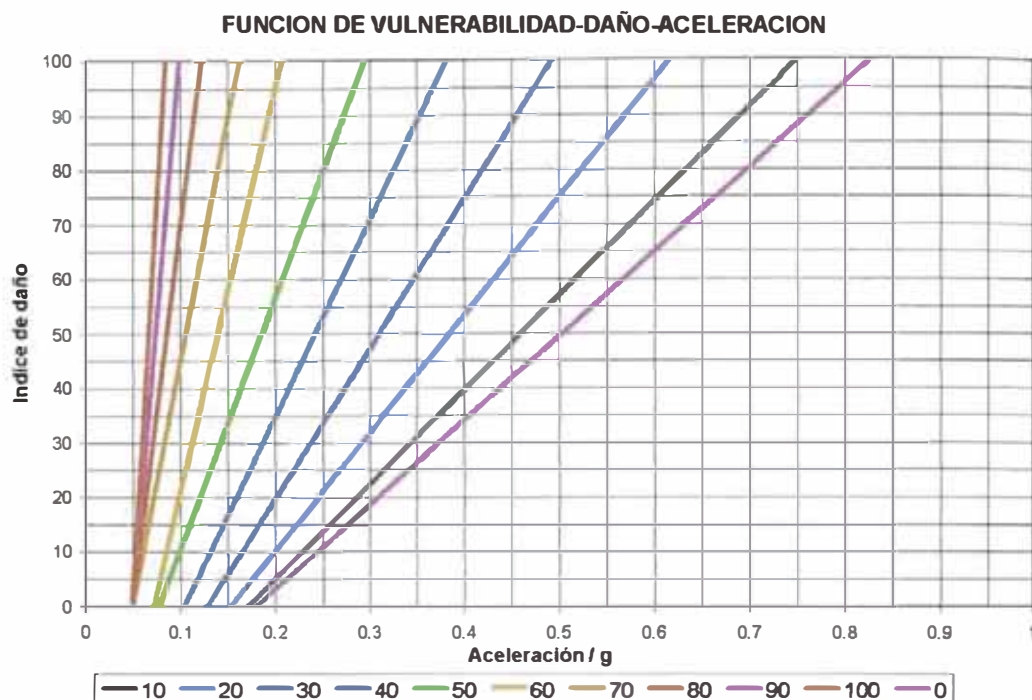


Figura 6.35 C: Funciones de vulnerabilidad-daño-aceleración para estructuras de mampostería reforzada o confinada.

Para hacer uso de estas funciones se tuvo que utilizar los valores del índice de vulnerabilidad normalizado cuya variación se encuentra entre  $0 < IV < 100$  así como para elaborar los mapas de escenarios de daño; los resultados del índice se clasifican en los siguientes 6 grupos: 0,0 – 2,5, 2,5 – 7,5, 7,5 – 15,0, 15,0 – 30,0, 30,0 – 60,0 y 60,0 – 100,0, esta clasificación de daño se utilizó basándose en las distintas escalas de daño propuesta en el Anexo G, en donde se define de una forma amplia el daño provocado por un terremoto a una estructura. La escala propuesta toma en cuenta las recomendaciones de todos los trabajos anteriores.

RANGOS DE DAÑO	SIGNIFICADO
0.0 – 2.5	Ninguno En este nivel, el daño en los elementos estructurales es mínimo, con la aparición de pequeñas grietas en elementos estructurales. No se requieren costos de reparación. Su efecto en la estructura es mínimo.
2.5 – 7.5	Ligero En este nivel, el daño en los elementos no estructurales es moderado, provocando inclusive el desprendimiento de algunos elementos. Pueden aparecer grietas en elementos estructurales como muros de carga, vigas o columnas, cuya reparación requiere inversión de un pequeño porcentaje de la estructura. Su efecto en la estructura es mínimo.
7.5 – 15.0	Moderado En este nivel, el daño en elementos no estructurales es moderado, incrementando con esto el costo de reparación. El comportamiento de la estructura en menor medida, pero no corre riesgo la estabilidad de la estructura.
15.0 – 30.0	Considerable En este nivel, el daño de los elementos estructurales es moderado, requiriendo grandes reparaciones, aunque no es riesgoso el desalojo del edificio. El costo de las reparaciones, será un porcentaje significativo de la estructura.

30.0 – 60.0	Fuerte	En este nivel, el daño en los elementos estructurales es muy importante, poniendo en riesgo la estabilidad de la estructura. En la mayoría de los casos el costo de reparación puede ser igual al costo del edificio, por lo que se recomienda la demolición, para la posterior construcción. En todo el tiempo se requiere el desalojo del edificio, por seguridad de las personas.
60.0 – 100	Severo	El nivel de daño en los elementos estructurales es muy grande, necesitando demoler el edificio, si antes no ha colapsado.

Tabla 6.13. Escala de daño considerado en este trabajo para la construcción de los mapas de escenario de daño propuesta en este trabajo.

Por simplicidad, las curvas de daño han adquirido una forma tri-lineal definido por dos puntos: la aceleración a la cual el daño comienza ( $ID > 0$ ) y la aceleración a que el edificio colapsa completamente ( $ID = 1$ ). Las ecuaciones que describen las rectas se muestran a continuación:

Iv normalizado	Ecuación de las curvas de daño		
	adobe y piedra	Mampostería confinada	Construcción informal
100	$ID=8.6154*(a/g)-0.1231$	$ID=2842*(a/g)-141.36$	$ID=1851.5*(a/g)-76.5$
90	$ID=7.6712*(a/g)-0.1371$	$ID=2016.3*(a/g)-100.62$	$ID=1391.5*(a/g)-57$
80	$ID=6.747*(a/g)-0.1325$	$ID=1373.3*(a/g)-68.705$	$ID=934*(a/g)-41$
70	$ID=5.8947*(a/g)-0.1368$	$ID=891.49*(a/g)-44.89$	$ID=741*(a/g)-29.5$
60	$ID=5.1376*(a/g)-0.1376$	$ID=739.79*(a/g)-53.642$	$ID=627*(a/g)-34$
50	$ID=4.5161*(a/g)-0.1452$	$ID=460.7*(a/g)-35.961$	$ID=456.5*(a/g)-25.5$
40	$ID=3.8356*(a/g)-0.1301$	$ID=360.93*(a/g)-37.682$	$ID=372.5*(a/g)-25.5$
30	$ID=3.2845*(a/g)-0.1261$	$ID=274.45*(a/g)-35.272$	$ID=301.5*(a/g)-24$
20	$ID=2.7861*(a/g)-0.1194$	$ID=215.51*(a/g)-32.912$	$ID=247.5*(a/g)-22.5$
10	$ID=2.4086*(a/g)-0.1226$	$ID=172.61*(a/g)-29.393$	$ID=1206.5*(a/g)-20.5$
0	$ID=2.0786*(a/g)-0.1198$	$ID=154.46*(a/g)-27.754$	$ID=181.5*(a/g)-20$

Tabla 6.14. Ecuaciones del índice de daño

Con estas ecuaciones se podrán calcular los índices de daño con base en el índice de vulnerabilidad normalizado y los movimientos sísmicos; también se procedió a efectuar una interpolación lineal entre los valores de las ecuaciones para valores intermedios de índices de vulnerabilidad normalizados.

Para realizar el cálculo del índice de daño de cada lote se escogieron los siguientes sismos a nivel de basamento rocoso:

- **Sismo de 0.10g**, este sismo se produjeron en noviembre de 1980, muy cerca de la ciudad de Ayacucho con una intensidad de V-VII MSK, que representa a un período de retorno de 25 años con 10% de excedencia.
- **Sismo de 0.32g**, es un sismo para un tiempo de exposición de 50 años con una probabilidad de excedencia del 10% (período de retorno de 475 años).
- **Sismo de 0.37g**, es un sismo para un tiempo de exposición de 100 años con una probabilidad de excedencia del 10% (período de retorno de 950 años).

Estas aceleraciones ubicadas en el basamento rocoso, serán amplificadas de acuerdo a los estudios de amplificación sísmica realizados en este trabajo, para lo cual los sismos escenarios se observarán en las láminas 15, 16 y 17.

En las láminas 20, 21 y 22 se muestran los niveles de daño para los tres sismos escenarios en nuestra área de estudio.

Utilizando la escala de la tabla 6.13, se obtendrán los siguientes resultados los cuales se muestran en la tabla 6.15, correspondiente al número de edificios y porcentaje de ellos, que sufren un cierto nivel de daño dependiendo de la intensidad del terremoto de estudio.

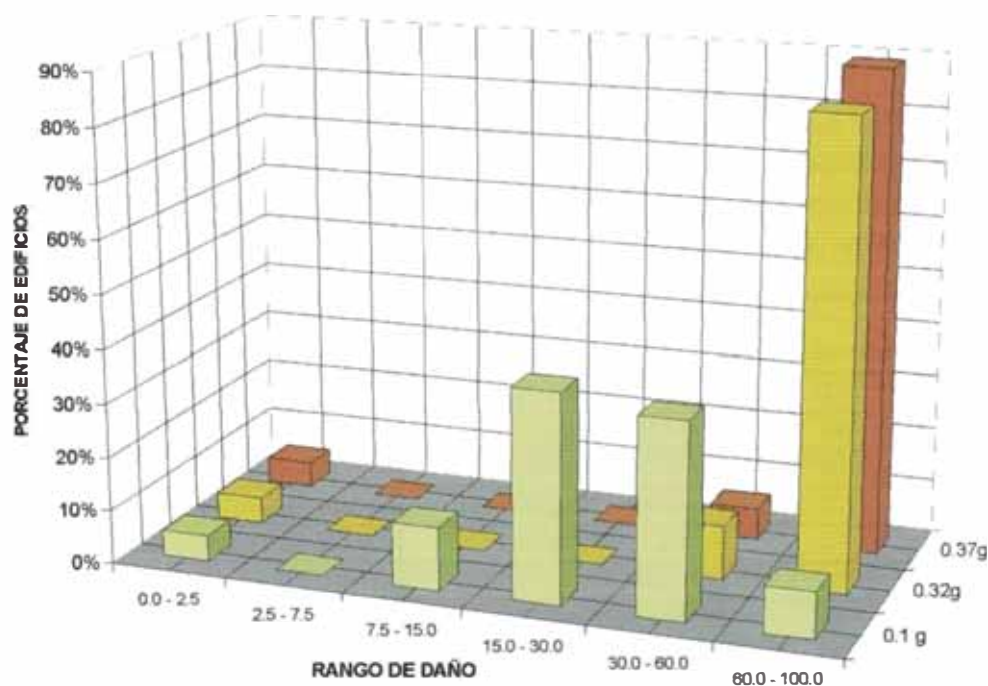


Figura 6.36: Porcentaje de edificios clasificados por grado de daño, dependiendo del terremoto de estudio considerado.

RANGO DE DAÑO	DAÑO OBTENIDOS PARA LAS ACELERACIONES EN EL BASAMENTO ROCOSO					
	0.1 g		0.32g		0.37g	
	N° lotes	%	N° lotes	%	N° lotes	%
0.0 - 2.5	74	4.846%	74	4.846%	74	4.846%
2.5 - 7.5	0	0.000%	0	0.000%	0	0.000%
7.5 - 15.0	179	11.722%	0	0.000%	0	0.000%
15.0 - 30.0	592	38.769%	0	0.000%	0	0.000%
30.0 - 60.0	551	36.084%	152	9.954%	88	5.763%
60.0 - 100.0	131	8.579%	1301	85.200%	1365	89.391%

Tabla 6.15. Resultados del índice de daños obtenidos, considerando tres terremotos de estudio.

Para el escenario de daño correspondiente a una aceleración de 0.1g en el basamento rocoso, se calcula que un 11.72% sufrirán daños importantes en los elementos estructurales (7.5 – 15 ) en donde será afectado el comportamiento de la estructura en menor medida, sin embargo no corre peligro la estabilidad de la estructura; el 38.77% de las edificaciones sufrirán un daño considerable (15 – 30), en el cual el daño en los elementos estructurales es importante, requiriendo grandes reparaciones, aunque no es necesario el desalojo de los edificios; el 36.08% sufrirá un daño fuerte (30 – 60), lo que implica que el daño de los elementos estructurales es muy importante poniendo en peligro la estabilidad de la estructura y en donde en la



mayoría de casos el costo de reparación es igual al costo del edificio, por lo que se sugiere la demolición de la estructura, en todo el tiempo se requiere el desalojo de la edificación; el 8.58% sufrirán daños muy severos (60 – 100) en donde el daño de los elementos estructurales será muy grande, necesitando demoler el edificio si es que antes no colapsó.

Para el escenario de daño correspondiente a una aceleración de 0.32g en el basamento rocoso, se calcula que el 9.95% sufrirán un daño fuerte, y que para este escenario el porcentaje de edificaciones que requieren demolición o han sufrido colapso es el 85.2%.

Por último para el escenario de daño correspondiente a una aceleración de 0.37g en el basamento rocoso, se puede notar que los daños son similares a los alcanzados por un sismo de 0.32g, reduciendo el porcentaje de daños fuertes e incrementándose los daños severos.

Una forma más avanzada de mostrar estos resultados es haciéndolo de forma tridimensional. De esta manera se puede apreciar la vulnerabilidad y el daño de los edificios de una forma más real, con la desventaja de requerir más recursos y datos para su elaboración, sin embargo, es una buena propuesta para el inicio de este tipo de mapas. Como ejemplo se muestran en las figuras 6.37 y 6.38 los mapas de índice de vulnerabilidad y escenarios de daños para una intensidad de 0.1g en el basamento rocoso, en tres dimensiones.



Figura 6.37: Vista tridimensional del mapa de vulnerabilidad sísmica





Figura 6.38: Vista tridimensional del mapa de escenarios de daño para una aceleración de 0.1g en el basamento rocoso.

En las láminas 20, 21 y 22 también se muestran los valores medios de los escenarios de daño calculados por manzanas. Esta forma de mostrar los resultados nos permitirá observar la distribución de los resultados en un contexto más adecuado para los estudios de riesgo sísmico a nivel urbano.

En la tabla 6.16 se puede observar que en daño promedio para un sismo de aceleración 0.1g, será de 31.35%, mientras que para el de 0.32g y 0.37g serán de 82.63% y 87.07% respectivamente.

ACELERACIONES	PORCENTAJE DE DAÑO MEDIO	
0.1 g	MIN.	16.15%
	PROM.	31.35%
	MAX.	67.57%
0.32 g	MIN.	61.54%
	PROM.	82.63%
	MAX.	100.00%
0.37g	MIN.	61.54%
	PROM.	87.07%
	MAX.	100.00%

Tabla 6.16. Porcentajes de daño promedio para cada aceleración dentro de la zona de estudio.

#### 6.4 Análisis de pérdidas económicas

Las pérdidas económicas ocasionadas por un terremoto son mayormente debido a:

- a. Daño estructural directo, por ejemplo fallas de vigas, excesivas deflexiones y normas diferenciales para edificaciones artesanales.

- b. Efectos indirectos, por ejemplo a elementos no estructurales, limpieza y financiamiento de reparación, pérdida debido al no funcionamiento del servicio.

Aunque hay métodos para estimar las pérdidas debido al daño estructural directo, la mayoría son calculados 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 GIS en la estimación de pérdidas regional, una simple fórmula para calcular las pérdidas directas de una edificación será:

$$\text{Pérdida} = \text{índice de daño esperado} \times \text{costo de edificación.}$$

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

Teniendo en cuenta todos estos parámetros, en este estudio se usaron la metodología del Concejo 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.

Las pérdidas monetarias indirectas son mucho más difíciles de identificar que las pérdidas debido a los daños estructurales directos. Frecuentemente a los contenidos y componentes 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. Otras pérdidas monetarias indirectas 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, no incluyen pérdidas por efectos inducidos (incendios, inundaciones, asentamientos, licuefacción, maremotos, etc.), o elementos no estructurales que resulten dañados (lámparas, televisores, ventanas, muebles, etc).

Así pues, se superpusieron los mapas de distribución de daños para los tres sismos escenarios mostrados en las Láminas 20, 21 y 22, con el mapa de valor de las edificaciones, generándose los mapas de distribución de pérdidas económicas para el sismo de 0.1g, 0.32g y 0.37g, todos en el basamento rocoso. Las Láminas 23, 24 y 25 muestran los mapas de distribución de pérdidas económicas directas para los tres sismos escenarios propuestos.

El Anexo I muestra algunas de las tablas que son emitidas por CONATA y que fueron usadas para el cálculo del valor de las edificaciones. La figura 6-39 y la tabla 6-17 muestran las pérdidas estimadas para las tres aceleraciones:

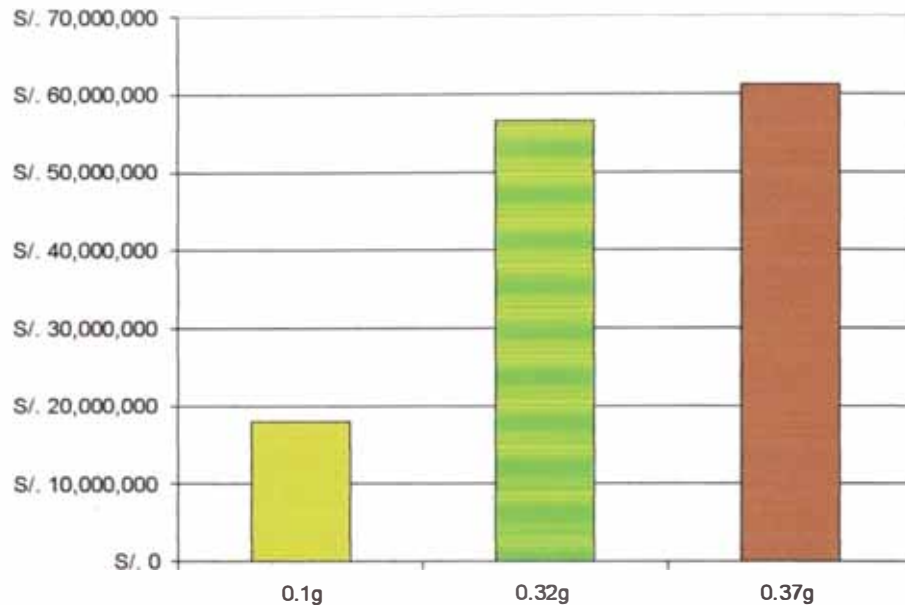


Figura 6.39: Pérdidas Estimadas para las tres aceleraciones de estudio.

	0.1g	0.32g	0.37g
<b>Pérdidas económicas totales</b>	S/. 17,920,032.24	S/. 56,610,400.54	S/. 61,285,940.18

Tabla 6.17. Tabla de pérdidas estimadas.

De acuerdo a la tabla 6.17 se puede observar que las pérdidas totales de los sismos de 0.32g y 0.37g en el basamento rocoso son casi similares, mientras que la de un sismo de 0.1g en el basamento rocoso es casi la tercera parte, como también se puede observar en la figura 6.18. A demás de acuerdo a la tabla 6.15 los sismos de 0.37g representan a la destrucción de casi la totalidad de los lotes, por lo que las pérdidas obtenidas producto de este sismo, tendrían que ser las máximas que se podrían obtenerse.

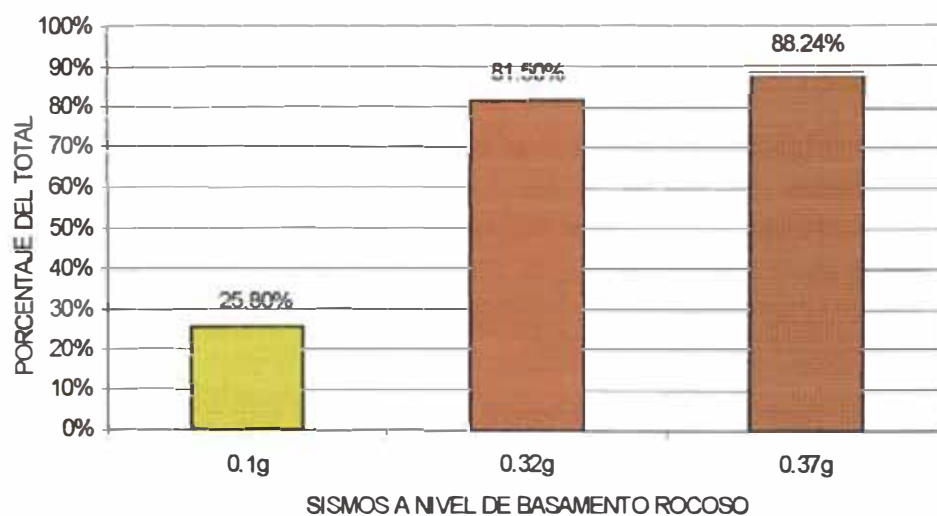


Figura 6.40. Porcentaje de pérdidas económicas del costo total de las edificaciones.

También se puede observar en la figura 6.19, una distribución de pérdidas en función del período de retorno de los sismos escenario, los cuales fueron calculados para un 10 % de excedencia; estos resultados nos pueden servir para calcular la pérdida máxima probable (PML) el cual será el estimador del tamaño de las pérdidas máximas que sería razonable esperar durante un período de exposición sísmica. En este modelo se define como pérdida estimada que ocurriría para un período de retorno determinado.

Como conclusión de las pérdidas obtenidas se podría decir que una zona de alto índice de daño como los mostrados en las láminas, no conlleva que las mayores pérdidas económicas directas ocurran en estos lugares, ya que las pérdidas económicas están en función directa al área construida, número de pisos y tipo de edificación; lo cual se puede observar en las láminas 23, 24 y 25.

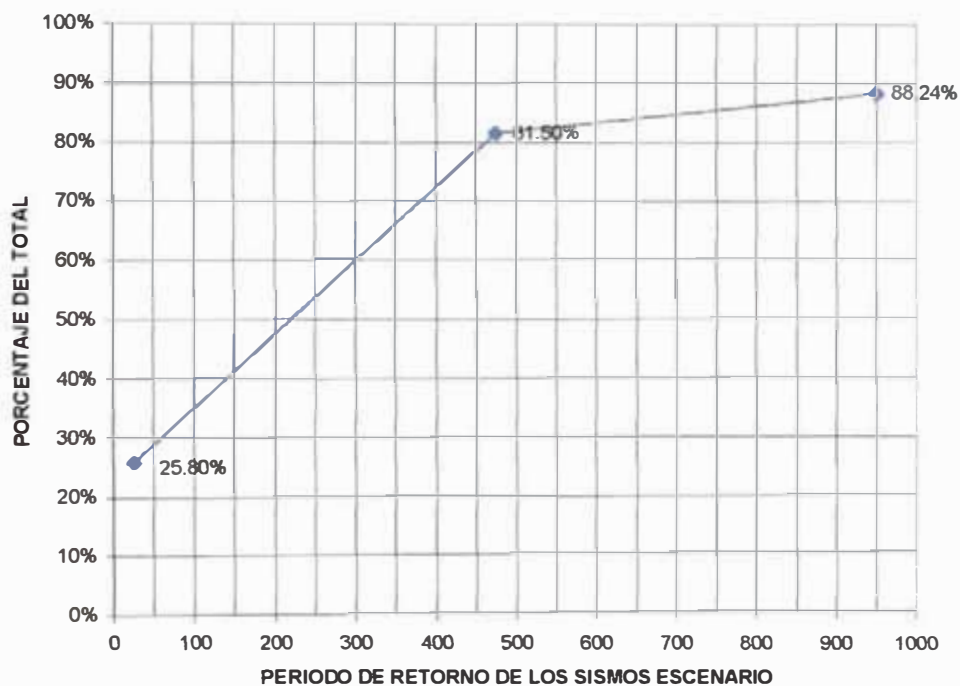


Figura 6.41. Porcentajes de pérdidas en función de los períodos de retorno de los sismos escenarios.

## 6.5 Resumen

En este capítulo se muestran finalmente los resultados planteados en nuestros objetivos iniciales, es decir el cálculo de los escenarios de daños para la zona en estudio, así como las pérdidas económicas producto de los sismos escenarios. Aunque en esta parte del trabajo se muestran en forma resumida el proceso utilizado para la evaluación de los parámetros de índice de vulnerabilidad de los edificios, el cálculo fue complejo y muy laborioso, debido a la gran cantidad de información que se tuvo que manejar en el presente trabajo. Aun así es mínimo comparado con el trabajo que se llevaría si se realizara un estudio detallado de cada edificio, y sobre todo por la importancia que estos resultados tendrán en los futuros planes de reducción de desastres.

En este apartado se hace una descripción del proceso de evaluación de los 11 parámetros del índice de vulnerabilidad mediante programas individuales para cada uno de estos, utilizando como base de datos toda la información obtenida mediante los trabajos de campo y evaluaciones realizadas a cada lote, luego del cual se realizó un análisis estadístico.

Adicionalmente en el anexo E se presenta los diagramas de flujo de los 11 parámetros con los cuales fueron calculados, para lo cual se tuvo como nomenclaturas los acápite de la ficha de evaluación.

Una parte importante de este capítulo es la forma en que se muestran los resultados obtenidos, presentando los resultados de la vulnerabilidad sísmica e índice de daños a nivel de lotes y para su mejor análisis por manzanas.

Concluyendo este capítulo se realizó el estudio de las pérdidas económicas por lotes, obteniendo resultados totales de pérdidas por cada sismo escenario.

Finalmente en el anexo F se muestran los resultados del índice de vulnerabilidad e índice de daño para la zona de estudio a nivel de lote.



**CAPITULO VII**  
**Conclusiones,**  
**Recomendaciones y**  
**Futuras Líneas de**  
**Investigación**

## 7 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

### 7.1 Conclusiones

Sin duda los estudios de Riesgo Sísmico son temas delicados por las graves consecuencias que realmente conllevan las catástrofes sísmicas, ya que no solo afectan el comportamiento de las estructuras, sino que causan las pérdidas de vidas humanas, la paralización de la actividad normal de la ciudad y una cantidad de efectos colaterales. Por tal motivo, los resultados obtenidos en este trabajo se deben analizar cuidadosamente antes de tomar cualquier decisión, para evitar que los resultados que sobreestimen el daño induzcan a considerarlos exagerados mientras que resultados que subestimen conduzcan a una falsa confianza, con las consecuentes medidas de emergencia que pueden llegar inclusive a ser nulas.

A continuación se presentan las principales conclusiones de este trabajo que hacen referencia a la metodología empleada, a la herramienta informática utilizada y a los escenarios de daño y pérdidas obtenidas.

#### **Conclusiones a los estudios realizados.**

Por los resultados obtenidos, se concluye que el suelo de la zona de estudio tiene un comportamiento bastante rígido, esto debido a que se encontraron períodos cortos y amplificaciones pequeñas en comparación con otras ciudades estudiadas.

- Los datos geológicos y geotécnicos han consistido en la recopilación de calicatas y ensayos de laboratorio que sirvieron conjuntamente con los estudios realizados en el presente trabajo como son los ensayos geofísicos de refracción sísmica y medición de microtrepidaciones, para poder definir las zonas geotécnicas sísmicas, de acuerdo a las características físico mecánicas y dinámicas de los suelos de fundación.

- La refracción sísmica nos presentó la estratigrafía de los puntos de análisis, por lo que se pudo notar que los suelos más duros se encontraban a una profundidad relativamente pequeña de la superficie.
- El análisis de peligro sísmico para un tiempo de exposición sísmica de 50 años y un nivel de confianza del 90%, para la ciudad de Ayacucho y específicamente para la zona de estudio es de una aceleración máxima de 0.32g, y para 100 años de exposición sísmica la aceleración máxima esperada es de 0.37g.
- Se obtuvieron relaciones espectrales para los distintos puntos de estudio de las refracciones sísmicas, con la cual se pudo conocer las amplificaciones sísmicas esperadas producto de los sismos simulados.

### **Conclusiones a la metodología empleada.**

- Uno de los objetivos 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.
- El método de índice de vulnerabilidad es adecuado para implementarlo en grandes ciudades (aplicación a nivel urbano), sólo en el caso que se disponga de la información mínima necesaria para evaluar la calidad sismorresistente de los edificios o estructuras que se estudian.
- Para la evaluación del daño de los edificios es importante disponer de funciones de vulnerabilidad calibradas para nuestra zona de estudio. Los resultados obtenidos aplicando funciones de otras zonas pueden inducir errores considerables, con el riesgo evidente en los resultados finales.
- La disponibilidad de una excelente base de datos ha permitido emplear el método de índice de vulnerabilidad a toda una muestra de los edificios representativos de la ciudad de Ayacucho, en este caso nuestra zona de estudio para la evaluación de vulnerabilidad sísmica.
- A pesar que la aplicación de la metodología descrita permite asignar un índice de vulnerabilidad y uno de daño a cada edificio singular, no hay que perder de vista el sentido probabilista del método y de los resultados obtenidos.
- Con respecto a los resultados obtenidos, tanto de los índices de vulnerabilidad como de la estimación de pérdidas económicas directas, se concluye que los parámetros que más castigan a las viviendas de esta zona de estudio son la organización del sistema resistente, calidad del sistema resistente y separación máxima de muros.
- Propuesta de las curvas de daño para las diferentes tipologías encontradas en la zona de estudio presentadas por el autor, haciendo una adaptación de las curvas presentadas por el CISMID mediante modelamientos y simulaciones estructurales.
- Se ha utilizado una metodología adaptada a la realidad peruana, en este caso la zona de estudio de Ayacucho. Esta metodología se puede utilizar en áreas

urbano marginales donde la construcción de viviendas tengan una predominancia de mampostería confinada y no confinada.

### **Conclusiones referentes a la herramienta informática utilizada.**

- La aplicación de la metodología del índice de vulnerabilidad (Benetti and Petrini) a todo en conjunto de edificios seleccionados, es inviable si no se dispone de una herramienta de almacenamiento, análisis y gestión de un volumen de información.
- El Sistema de Información Geográfica (ArcView), es una herramienta de alto nivel y de fácil manejo, y que ha resultado ser un excelente medio para la manipulación y gestión de toda la información disponible.
- Es importante diseñar la aplicación informática de forma abierta para permitir actualizar la información disponible e incorporar nuevas capas de información que permitan avanzar hacia evaluaciones integradas de riesgo que consideren muchos otros aspectos que complementan los estudios del riesgo.
- El dato del año de construcción y del estrato económico favorece a ubicar a las viviendas dentro de practicas constructivas típicas y a poder asumir distribuciones arquitectónicas típicas de acuerdo a lo que se practica en los estratos socio-económicos, para calcular datos indirectos, tal como se realizó.
- La información sobre las áreas construidas de cada lote son datos substanciales que se encuentran en las fichas de evaluación y vistas aerofotográficas. Con ello se puede calcular la configuración en elevación y la irregularidad en planta.

### **Conclusiones referentes a los resultados obtenidos.**

- La base de datos disponible y los estudios metodológicos realizados, han permitido analizar el riesgo sísmico de los edificios, permitiendo generar escenarios de daños para la zona de estudio.
- En el presenta estudio el 35.03 % de los lotes evaluados se encuentra con un índice de vulnerabilidad entre 0 a 20, el 36.87 % se encuentra entre 20 a 40, observándose que dentro de estos dos grupos se tienen a la mayoría de los edificios evaluados representando a una vulnerabilidad baja a media; restando el 28.1% de las edificaciones con una vulnerabilidad alta.
- Según las estadísticas los edificios de albañilería tienen una vulnerabilidad de media a baja en su mayoría, mientras que en las construcciones de adobe, tapial y piedra tienen una vulnerabilidad de media a alta.
- Para el escenario de daño correspondiente a una aceleración de 0.1g en el basamento rocoso, se calcula que un 11.72% sufrirán daños importantes en los elementos estructurales (rango de daño entre 7.5 – 15 ) en donde será afectado el comportamiento de la estructura en menor medida, sin embargo no corre peligro la estabilidad de la estructura; el 38.77% de las edificaciones sufrirán un daño considerable (rango de daño entre 15 – 30), en el cual el daño en los elementos estructurales es importante, requiriendo grandes reparaciones,

aunque no es necesario el desalojo de los edificios; el 36.08% sufrirá un daño fuerte (rango de daño entre 30 – 60), lo que implica que el daño de los elementos estructurales es muy importante poniendo en peligro la estabilidad de la estructura y en donde en la mayoría de casos el costo de reparación es igual al costo del edificio, por lo que se sugiere la demolición de la estructura, en todo el tiempo se requiere el desalojo de la edificación; el 8.58% sufrirán daños muy severos (rango de daño entre 60 – 100) en donde el daño de los elementos estructurales será muy grande, necesitando demoler el edificio si es que antes no colapsó.

- Para el escenario de daño correspondiente a una aceleración de 0.32g en el basamento rocoso, se calcula que el 9.95% sufrirán un daño fuerte, y que para este escenario el porcentaje de edificaciones que requieren demolición o han sufrido colapso es el 85.20%.
- Por último para el escenario de daño correspondiente a una aceleración de 0.37g en el basamento rocoso, se puede notar que los daños son similares a los alcanzados por un sismo de 0.32g, reduciendo el porcentaje de daños fuertes e incrementándose los daños severos.
- El análisis realizado a las diferentes aceleraciones sufrieron un incremento relativo de su magnitud, esto debido a los efectos locales del área de estudio, dándonos como resultado un sismo no homogéneo en toda el área de estudio.
- Los daños obtenidos producto de los tres sismos escenarios son de media a altos, esto producto de que los sismos utilizados son sismos extraordinarios que con las amplificaciones locales serán mucho más destructivos; haciendo una comparación de los sismos registrados en la ciudad de Ayacucho en 1980 en donde el sismo producido reflejó una intensidad de grado VII, que representa una aceleración de 0.15g a nivel de superficie, que llevándolo al basamento rocoso tendría una media de 0.075g.
- De acuerdo a los estudios se pueden observar que las pérdidas totales de los sismos de 0.32g y 0.37g son casi similares, mientras que en la de un sismo de 0.1g es casi la tercera parte. A demás de acuerdo a las estadísticas se nota que el sismo de 0.37g representa a la destrucción de casi la totalidad de los lotes, por lo que las pérdidas obtenidas producto de este sismo, tendrían que ser la máxima que se podría obtener.
- Se estima que los costos calculados de pérdidas materiales directas, están por encima de lo que realmente podría acontecer en la zona de estudio gracias a cualquiera de los eventos simulados. La práctica de los estudios de Riesgo Sísmico en otras ciudades ha demostrado que los resultados siempre estiman pérdidas mayores a las que realmente ocurren una vez se tiene la oportunidad de comparar con movimientos sísmicos reales.
- Los resultados cuantitativos de este trabajo están debidamente especificados y detallados en los capítulos anteriores.



Es fundamental transferir los resultados obtenidos a los organismos con responsabilidad de gestión de la protección civil y en la planificación de gestión de emergencia, para elaborar planes de emergencias viales.

## 7.2 Recomendaciones y futuras líneas de investigación.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de instituciones como el CISMID, municipalidad Distrital de Jesús de Nazareno. Estas colaboraciones, deben basarse a un interés mutuo contrastable. Los resultados de este trabajo servirán a las instituciones para el desarrollo de planes de emergencia sísmica. Eso significa que es importante implicar en este tipo de estudios a instituciones involucradas en aspectos relacionados con la temática que en ellos se abordan. Sin duda la cantidad y calidad del trabajo hubiera aumentado con la participación o implicación de otras instituciones como por ejemplo La municipalidad de Huamanga, El Gobierno Regional, Colegios profesionales.

Para la ampliación de este tipo de estudios a otras estructuras o infraestructuras como las líneas vitales es imprescindible la implicación de las compañías privadas. Hay que avanzar en la implicación de las empresas en estudios de Riesgo Sísmico haciéndoles ver que las principales beneficiadas son ellas mismas pues serán conocedoras de un riesgo real y su dimensión correcta permitiéndoles tomar las decisiones para su minoración. Es sólo así como se consolidarán los pequeños avances en la mejora del bienestar en la disminución de los riesgos a los que se haya expuesta la sociedad.

De la experiencia recogida en este trabajo y en otros previos relacionados con el Riesgo Sísmico en entornos urbanos, se pone de manifiesto la dificultad de este tipo de estudios de Riesgo Sísmico. Sin embargo a nuestro entender la rentabilidad potencial de este tipo de estudios es alta ya que apuntan directamente hacia la reducción del riesgo. La única herramienta disponible eficaz para reducir el daño sísmico reside en la reducción de la vulnerabilidad de las edificaciones y ello pasa por un conocimiento de la misma. Las principales recomendaciones y líneas de investigación sugeridas por el presente estudio se recogen en los siguientes apartados como el caso de las conclusiones.

### Recomendaciones sobre los estudios realizados

- 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.

Se recomienda utilizar los estudios realizados en este trabajo y los resultados obtenidos para la investigación de futuros trabajos que tengan como finalidad la de obtener una espectro propio para la ciudad de Ayacucho.

Se recomienda realizar estudios más profundos para así poder tratar de ubicar la profundidad del basamento rocoso, así poder realizar un análisis de

amplificación sísmica más precisa, esto no quiere decir que los resultados obtenidos en este estudio se alejen de la realidad.

### **Recomendaciones referentes a la metodología.**

- En este trabajo se han analizado solo edificios de mampostería. Es conveniente desarrollar funciones de vulnerabilidad para las restantes tipologías existentes en la ciudad. Ello permitirá ampliar la muestra de edificaciones a las que se aplicaría el método.
- Revisar mediante herramientas avanzadas las funciones de vulnerabilidad desarrolladas. Estas herramientas deben permitir la simulación 3D de los edificios, considerando la interacción suelo-estructura, así estudiar el comportamiento conjunto de las estructuras monolíticas que componen muchas de las manzanas de nuestra zona de estudio.
- 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: hospitales, colegios, puentes, carreteras, redes de agua y desagüe, son casi nulos. 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.
- En lo posible se deben desarrollar nuestras propias curvas de vulnerabilidad para la metodología propuesta o calibrar las curvas existentes para la ciudad a medida que se presenten movimientos sísmicos en la región. De ser posible, en la ciudad de Ayacucho colocar al menos un acelerógrafo para poder registrar los movimientos del terreno y poderlos relacionar con los daños observados en las viviendas.
- Analizar los efectos de acoplamiento de los edificios de tipologías diferentes.
- 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.
- Aplicar otras metodologías de análisis de Riesgo Sísmico para comparar los resultados obtenidos. Estas metodologías incorporan parámetros básicos de la acción sísmica más adaptados al estudio del comportamiento dinámico de estructuras, como por ejemplo la aceleración del suelo, los desplazamientos, aceleraciones y velocidades espectrales, o los desplazamientos permanentes, dependiendo del tipo de estructura.

### **Recomendaciones referentes a la herramienta informática**

Las principales recomendaciones referentes a las herramientas informáticas que se utilizó hacen referencia a los datos. Realmente se trata de estar atentos a la evolución de los Sistemas de Información Geográfica e incorporar las mejoras de software y equipos que permitan un tratamiento más amigable de la información y su exportación

para ser utilizada en otros entornos. Por lo que realmente permiten este tipo de estudios la creación y mantenimiento de bases de datos completas y fiables. Desgraciadamente el seguimiento de información disponible en las bases de datos referentes a las tipologías constructivas han puesto de manifiesto que estos datos se gestaron con fines de cuantificación de impuesto económico y municipales, por lo que en este estudio se tuvieron que realizar trabajos para la obtención de base de datos reales que nos permita utilizar la metodología.

Otros aspectos importantes hacen referencia a una extensión del estudio para considerar otros aspectos fundamentales en la evaluación del Riesgo Sísmico como por ejemplo los edificios esenciales, el patrimonio histórico cultural y las líneas vitales así como la capacidad de respuesta de los servicios involucrados en la recuperación de una emergencia o catástrofe.

Resumimos algunos aspectos relevantes y concretos:

- Prestar atención a los desarrollos del SIG para adoptar sistemas más amigables y potentes.
- Incorporar equipos y plataformas amigables y seguras.
- Los datos son el núcleo de todo estudio de Riesgo. Es imprescindible actualizar la información. Para ello hay que promover sistemas de actualización automática de las bases de datos aprovechando los mecanismos que la administración pública del estado y municipalidades disponen para ello.
- Es muy conveniente involucrar a los organismos públicos y privados en la evaluación del Riesgo Sísmico para obtener su interés y complicidad en la obtención de datos necesarios para este tipo de estudios.
- Esta claro que el estudio aquí realizado es parcial puesto que solo analiza edificaciones residenciales. Así mismo se debe de contar con una base de datos que permitan el análisis de otros aspectos fundamentales del riesgo como las de líneas vitales, servicios y edificaciones esenciales, entre otros.
- Incorporar a las bases de datos información anual económica y del valor de las instalaciones, edificios y servicios para alimentar un módulo de evaluación más real de costo.
- Incorporar otra información sensible del tipo socio-económico como evolución de la población y su movilidad que permita establecer de forma automática escenarios de daño.
- Dotar a las bases de datos de una estructura que permita el análisis a nivel regional. Este aspecto es particularmente importante cuando se quiere incorporar aspectos referentes a las líneas vitales. Estas trascienden el entorno urbano.

#### **Recomendaciones referentes a los resultados.**

- Los resultados obtenidos hacen referencia a una muestra de dos tipologías típicas y mayoritarias en la zona de estudio. Las de mampostería de adobe y

albañilería. Estos nos han permitido diseñar escenarios de daño razonablemente completos. Esto no impide que sea conveniente continuar estudio que permitan el análisis de otros tipos de tipología constructiva que por falta de funciones de vulnerabilidad no han sido analizadas.

- También es fundamental analizar los resultados obtenidos desde una óptica probabilista. Un daño del 90% asignado a una edificación indica una probabilidad alta de colapso de aquel edificio pero no un colapso seguro, por esto el escenario de daño diseñado adquiere sentido cuando se refieren a una colectividad suficiente de edificios. De hecho en las metodologías avanzadas actuales el aspecto probabilista adquiere una dimensión explícita.
- La adaptación del método para la ciudad, es un primer acercamiento a lo que podría llegar a utilizarse en un futuro. Es recomendable asesorarse de un número amplio de arquitectos, ingenieros calculistas, ingenieros constructores, ingenieros de suelos y maestros de obra para definir las metodologías constructivas de varias épocas y en varias zonas para la ciudad, de tal forma que se cuente con una información más completa y real que con la trabajada en esta adaptación.
- Los estudios de vulnerabilidad deben ser periódicos para tener en cuenta daños en sismos pasados y modificaciones como resultado de un cambio de destino. Por esta razón, en cada visita del empadronador al mismo predio se deben rectificar las medidas anotadas en la visita anterior.
- Se necesita de una campaña de publicidad para que la comunidad esté pendiente de recibir la visita de los empadronadores, debidamente identificados y autorizados por la Alcaldía Municipal y la Universidad. Esta campaña también sería necesaria para invitar a otras instituciones a participar en este y otros proyectos relacionados con la mitigación de riesgos para 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.





**REFERENCIAS**

- Aguilar, R. (2001). “Métodos de Prospección Sísmica en la investigación del subsuelo”. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Alfaro, A., Junco, J., Franco, A. y Torres, A. (2000). “Reducción del Riesgo Sísmico de Ciudades Intermedias en Colombia. Retos y Limitaciones”. VIII CCG 2000–Sociedad Colombiana de Geotecnia.
- Angeletti, P., Bellina, A., Grandori, G., Moretti, A. y Petrini, V. (1988). “Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results”, Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Kyoto, Japan.
- ATC-13. (1985). “Earthquake damage evaluation for California”. Federal Emergency Management Agency, 555 Twin Dolphin Drive, Suite 550, Redwood City, CA 94065.
- ATC-14. (1987). “Evaluating the seismic resistance of existing buildings”. National Science Foundation. San Francisco, California.
- ATC-21 (1988).”Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: Supporting documentation”. Federal Emergency Management Agency,. USA.
- ATC-21-1. (1988).”Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: Supporting documentation”. Federal Emergency Management Agency,. USA.
- ATC-40. (1996). “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings”. Seismic Safety Commission. California.
- Barbat, A., Yépez, F. y Canas, J. (1996). “ Simulación de escenarios de daño para estudios de riesgo sísmico”. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. CIMNE, Barcelona.

- Benedetti, D., Benzoni, G. y Parisi, M. A. (1988). "Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 183-201.
- Braja, M. (1999). "Principios de Ingeniería de Cimentaciones". California State University, Sacramento.
- Bommer, J., Salazar, W. y Samayoa, R. "Riesgo sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador". PRISMA. Programa Salvadoreño de Investigación Sobre Desarrollo y Medio Ambiente.
- Boroschek, R. "Procedimiento para el Desarrollo de la Vulnerabilidad". Centro Colaborador OPS/OMS Mitigación de Desastres en Establecimientos de Salud Universidad de Chile.
- Bozzo, L. y Barbat, A. (2002). "Diseño Sismorresistente de Estructuras". Instituto de la Construcción y Gerencia, ICG. Lima, Perú.
- Caicedo, C. (1993). "Vulnerabilidad Sísmica en Zonas Urbanas. Aplicación a un Sector de Example de Barcelona". Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Cano, L., (1996). "El método de las microtrepidaciones como aporte a la microzonificación sísmica de ciudades caso: Armenia". Universidad de los Andes. Bogotá. Colombia.
- Castillo, J. (1994). "Peligro Sísmico en el Perú". Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Cardona, O. (2002). "Modelación Numérica para la Estimación Holística del Riesgo Sísmico Urbano, Considerando Variables Técnicas, Sociales y Económicas". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes Bogotá. Colombia.
- Ccallo, F. (2002). "Estimación de Mw a partir de isosistas de intensidad máxima para sismos de subducción ocurridos en Perú". Escuela Profesional de Ingeniería Geofísica. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.
- Chavarría, D. y Gómez, D. (2001). "Estudio de Vulnerabilidad Sísmica en viviendas de 1 y 2 pisos de Barrio Cuarto de Legua en el Cono Cañaveralejo". Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Colombia.
- CISMID-UNI. (2003). "Estudio de exploración geofísica, método de Refracción Sísmica, rehabilitación del canal de conducción C. H. Quicapata-Ayacucho". Informe final CISMID. Lima.
- CISMID-UNI. (2003). "Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo sísmico en 10 distritos de la gran Lima y Callao". APESEG/CISMID-EVR-LYC. Lima. }
- CISMID-UNI. (2002). "Vulnerabilidad sísmico del distrito de La Molina". Lima.

- CISMID-UNI. (2002). "Zonificación Geotécnica Sísmica de la ciudad de Moquegua". Concurso "Santiago Antunez de Mayolo". Proyecto 385-2001-CONCYTEC-AOJ. Lima, Perú.
- Department of the Army. (1995). "Geophysical Exploration for engineering and Environmental Investigations". U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000. USA.
- ESRI. (1996). "ARCVIEW GIS". Environmental systems Research Institute, Inc. USA.
- Hammer, J., Zavala, C. y Sánchez, R. (2001). "El terremoto del 23 de Junio del 2001 en el Sur del Perú". Informe sobre el reconocimiento del 27 al 30 de Agosto del 2001 en las zonas afectadas (Tacna, Moquegua y Arequipa).
- Herráiz, M. (1997). "Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros". Derechos reservados por la universidad Nacional de Ingeniería-CISMID. Perú.
- Huamán, C. (1991). "Microzonificación Sísmica de La Punta y el Callao". Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- INDECI-PERÚ. (2003). "Mapa de peligros de la ciudad de Ayacucho, informe principal". Proyecto INDECI-PNUD PER/02/051 Ciudades Sostenibles. Perú.
- ININVI. (1987). Adobe Norma E-080, Lima , Perú.
- Intermediate technology Development Group, ITDG-Perú. (1999). "Estructuras resistentes a desastres". The Institution of Civil Engineers, Londres.
- JMA "Seismic Intensity Scale", Japan Meteorological Agency. <http://www.kishou.go.jp>.
- Kanai, K. y Tanaka, T. (1961). "On microtremors". VIII, Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 39,97-114.
- Kawasumi, H. y Shima, E. (1964). "Spectra of microtremors observed in the city of Anchorage and their relation to soils". Earthquake Research Institute. The University of Tokyo. Japan
- Kersting, L. (2002). "Seismic vulnerability of existing buildings". Institute of Structural Engineering Swiss Federal Institute of Technology. Zurich.
- King, S. y Kiremidjian, A. (1994). "Regional Seismic Hazard and Risk Analysis Through Geographic Information Systems". Department of Civil Engineering Stanford University. USA.
- King, S., Kiremidjian, A., Rojahn, C. y Scholl, R. (1994). "Earthquake hazards and loss estimation using Geographic Information Systems. *Proceedings of the Tenth European Conference on Earthquake Engineering*. Vienna, 2, 1135-1140.
- Kramer, S. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering". University of Washington. USA.

- Kuroiwa, J. (2002). "Reducción de desastres, viviendo en armonía con la naturaleza". Lima.
- Lancelin, L. (2000). "Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de un Edificio". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII). Universidad Politécnica de Madrid
- Martínez, L. y Alfaro, A. (2001). "Avances en la Microzonificación Sísmica de Ibagué – Colombia – Datos de Campo". Instituto Geofísico Universidad Javeriana.
- Mena, U., Pujades, L. y Canas, J. (2001). "Automatización de los resultados del estudio de Riesgo Sísmico en la Ciudad de Barcelona", 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, CD-ROOM, Paper 024.1, Madrid, España.
- Moreno, L y Alfaro, A." De Los Microsismos a Los Microtemblores", VIII CCG - Sociedad Colombiana de Geotécnica, Instituto Geofísico Universidad Javeriana, Santa Fé de Bogotá, Colombia.
- Mena, U. (2002). "Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas". Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Miranda E. (1996). "Assessment of the seismic vulnerability of existing buildings", *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, (CD-ROM) Paper No. 513.
- Miranda E. (1999). "Approximate Seismic Lateral Deformation Demands In Multistory Buildings". *Journal of Structural Engineering*.
- Moreno, R. (2002). "Vulnerabilidad Sísmica de la Ciudad de Moquegua". Tesis de grado. Universidad Nacional de Ingeniería. CISMID.
- Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", *QR of RTRI* 30, no. 1, February, 25-33.
- Nakamura, Y. (2000). "Clear Identification Of Fundamental Idea Of Nakamura's Technique And Its Applications". *Procc. 12WCEE*. New Zeland.
- NCSE-94. (1994). "Norma de Construcción Sismorresistente, Parte General y de Edificación, Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes", Real Decreto. España.
- NTE. (2001). "Normas Peruanas de Estructuras". Perú.
- Olarte, J., Zavala, C., Aguilar, Z. Vásquez G, y Escobar, R. (2003). "Estimación de la pérdida máxima probable PML en 10 distritos de la Gran Lima y Callao: Aplicación a la industria aseguradora peruana". Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Oshiro, F. (1998). "Edificios de Concreto Armado, Cálculo Estructural Antisísmico". México.

- Pantoja, J., Calpa, C., Moncayo, H y Alfaro, A. (2000). “Riesgo Sísmico y Amenaza Volcánica en la Ciudad de Pasto”. VIII CCG 2000 – Sociedad Colombiana de Geotecnia.
- Rivera, J., Pique, J. y Morales, R. (2002). “Diseño Estructural Sismorresistente”. Instituto de la Construcción y Gerencia, Fondo Editorial ICG. Lima, Perú.
- SHAKE (2000). “A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems”. USA.
- Segui, W. (1999). “Diseño de Estructuras de Acero con LRFD”. Universidad de Memphis. USA.
- Tapia, P., Roldán, W. y Villacís, C. (1998). “Vulnerabilidad Sísmica de las ciudades del norte de Chile: Arica, Antofagasta y Copiapo”. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte. Antofagasta, Chile.
- Tavera, H. “ Peligro Sísmico en Lima y en País”. Centro Nacional de Datos Geofísicos del IGP.
- Tavera, H., Vilcampoma, L. y Millones, J. (1999). “El Terremoto de Chuschi – Quispillacta (Ayacucho) del 31 de Octubre de 1999 (MW=4.5)”. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. Instituto Geofísico del Perú.
- Whitlow, R. (1994). “Fundamentos de la Mecánica de Suelos”. Compañía Editorial Continental. México, DF.
- Yépez, F. (1994). “Vulnerabilidad Sísmica de Edificios de Mampostería para Estudios de Riesgo Sísmico”. Tesis de Master, escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Zavala, C., Scaletti, H., Proaño, R. y Duran. R. (2003). “Determinación de Respuesta Estructural de Edificaciones en Base a Modelos de un Grado de Libertad para la Determinación de la Vulnerabilidad Estructural”. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Civil. Lima.