

8. PROCEDIMIENTOS, TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y RESULTADOS

8.1 GENERALIDADES

A partir de los datos recolectados en campo y teniendo en cuenta las investigaciones realizadas que dan sustento a este trabajo, se procedió a calificar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones objeto de estudio, aplicando la metodología desarrollada por el autor en el Capítulo 6 y las categorías de daño sísmico con base en la metodología de *Hurtado* (1990), descrita en el Capítulo 5. Con base en estos resultados se construyeron escenarios de vulnerabilidad y daño georeferenciados y graficados predio a predio, mediante la utilización de un sistema de información geográfica (SIG).

Es necesario aclarar que debido a lo preliminar del estudio como herramienta de primera aproximación para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones objeto de estudio, obedece a criterios netamente cualitativos, cuya validez puede ser afirmada o rectificadas en la medida que se realicen estudios con mayor grado de detalle, en función de los resultados esperados. Por lo tanto estos resultados deben constituir un insumo importante para el conocimiento más integral del barrio que permita la identificación de parámetros que en primera instancia pueden constituir un riesgo para los habitantes de las viviendas, priorizando su intervención.

8.2 DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

8.2.1 Procedimiento

Con base en la información recolectada y las características arquitectónicas, estructurales y constructivas de la edificaciones, se procedió a calificar cada uno de los indicadores de vulnerabilidad teniendo en cuenta los criterios de decisión establecidos por la metodología. Se determinó el grado de vulnerabilidad cualitativa por indicador y el físico-global o de conjunto de las 570 edificaciones objeto de estudio, y cuyos resultados se muestran en el **anexo A.4**

Resultado de la inspección y análisis correspondientes los datos de la evaluación tanto en campo como escritorio, se ingresaron, analizaron y procesaron en una hoja de cálculo programada en **Excel**, en la que se realizó el manejo y tratamiento estadístico de la información, determinándose así la vulnerabilidad por indicador y la vulnerabilidad física-global o de conjunto de la edificación.

8.2.2 Análisis y resultados

Según lo estipulado en el marco teórico, en un asentamiento se pueden identificar dos condiciones de vulnerabilidad las cuales pueden ser: por origen ó progresiva. En este orden de ideas, particularmente en el barrio San Antonio convergen estas dos condiciones, producto de su desarrollo histórico y su crecimiento urbano.

Al respecto *Aprile & Mosquera* (1984), aportan elementos de análisis para la comprensión del espacio residencial, que se pueden relacionar con las causas de vulnerabilidad de un conjunto urbano, describiéndolo de la siguiente manera:

“ En tanto que producto social construido sucesivamente, toda aglomeración urbana o rural consiste en la imbricación histórica de las diversas estructuras (sociales, económicas, físicas) que ha albergado desde su creación o fundación. De hecho, el plan de la ciudad es yuxtaposición de planos anteriores, sumatoria de momentos históricos, donde coexisten, en forma de vestigios, los tipos arquitectónicos y urbanísticos del pasado con los actuales y vigentes y se insinúan por medio de programas, de proyectos o edificios muy recientes o en construcción las tendencias y técnicas futuras”.

De acuerdo con lo anterior, se ha identificado que las edificaciones construidas en el barrio San Antonio,

Alrededor del 75% de las edificaciones estudiadas fueron construidas antes de la década de los 50, y pertenecen a estilos arquitectónicos como el republicano, de tradición colonial y ecléctico, las cuales presentan una **vulnerabilidad progresiva**, Debido a que por lo general, muchas de estas edificaciones han sufrido transformaciones, mediante adiciones, mutilaciones, cambios de uso, etc, con algunas excepciones. Por otro lado, se puede decir que un gran porcentaje de estas edificaciones no han sido objeto de un mantenimiento integral en los últimos años, factor que incide

en le deterioro de la vivienda y por ende, aumenta su vulnerabilidad.

Cabe señalar igualmente que estas edificaciones también presentan una **vulnerabilidad por origen** a pesar de haber sido construidas sobre terrenos relativamente buenos, debido a la utilización de técnicas tradicionales y materiales de construcción de baja calidad en épocas anteriores, las cuales presentan deficiencias estructurales, constructivas y arquitectónicas.

Vale la pena señalar que el 25% restante de las edificaciones estudiadas, corresponden a construcciones modernas, que no han escapado a pesar de haber sido construidas en épocas posteriores a los años 50, de las deficiencias anteriormente mencionadas.

Se pudo establecer que un 78 % de las edificaciones estudiadas, presentan una vulnerabilidad moderada (figura 127) con tendencia a ser alta, debido a que la mayoría de las edificaciones califican con valores muy cercanos a este límite.

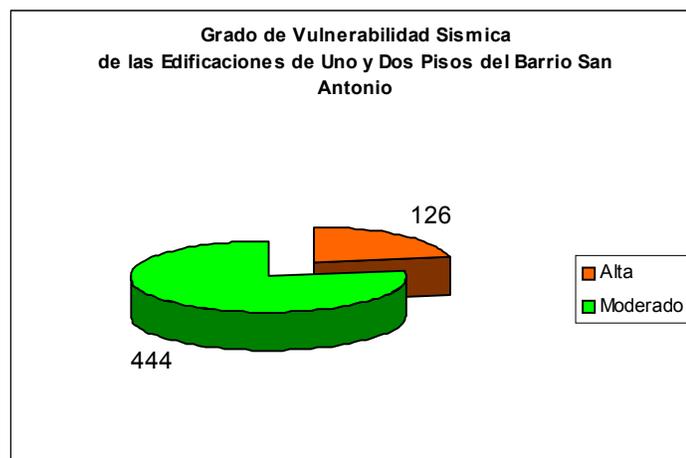


Figura 127. Grado de vulnerabilidad física-global

8.3 DETERMINACIÓN DE LA CATEGORÍA DE DAÑO SÍSMICO

8.3.1 Procedimiento.

Según *Campos* (1992) una forma de estimar cuales son las estructuras que van a sufrir más daño debido a solicitaciones sísmicas, es comparando la demanda de ductilidad y resistencia con la capacidad. En un proceso de diseño, la capacidad de los componentes se provee por lo menos igual a la demanda, pero cuando se trata de un edificio existente, los valores se comparan con las capacidades de los componentes; de esta forma se pueden determinar cuales son los elementos críticos. Por lo tanto, la única forma de saber cuales elementos se van a caer primero, es comparar la porción sísmica de su demanda con la porción sísmica de su capacidad (*ATC-22*, 1989, en *Campos*, 1992).

Según *ATC-22* (1989), en *Campos* (1992), en un proceso de diseño las fuerzas laterales a que va estar sometida una edificación, se obtiene a partir del calculo de la cortante basal que incluye el factor de modificación de respuesta "R". Existe una relación entre las fuerzas y la ductilidad, en el cual sistemas con gran ductilidad tienen un factor R mayor, lo que conduce a menores fuerzas para el diseño. Por lo tanto la única forma de saber cuales elementos se van a caer primero, es comparar la porción sísmica de su demanda con la porción sísmica de su capacidad.

De acuerdo con lo anterior, se determinó el cálculo de la resistencia sísmica de las edificaciones como parámetro físico para la estimación aproximada de posibles daños en las viviendas de uno y dos pisos de mampostería, con base en el método propuesto por *Hurtado* (1990) en *Campos* (1992), el cual fue utilizado en el proyecto **“Mitigación del Riesgo Sísmico en Cali”** (Fase I), proyecto que adelantó el Observatorio Sismológico del Sur Occidente OSSO (*Campos*, 1992).

La estimación de las categorías de daño sísmico en las edificaciones al interior del barrio, constituye un primer ejercicio de índole académico, cuya finalidad es estimar de manera preliminar (con los datos disponibles, tales como información planimétrica, levantamientos arquitectónicos y del inventario recolectado), indicadores de posibles escenarios hipotéticos en las 570 edificaciones objeto de estudio.

De acuerdo con lo anterior y debido a la escasa información referente a la planimetría de cada uno de los predios del barrio, se procedió a utilizar 50 levantamientos arquitectónicos elaborados por los estudiantes de la escuela de Arquitectura de la Universidad del Valle, (convenio entre la Universidad y la Cámara de Comercio de Cali, trabajos desarrollados entre los años 2000 y 2001). Estos levantamientos se utilizaron para calcular de manera aproximada la longitud de muros en cada una de las dos direcciones de las edificaciones.

8.3.1.1 Definición de los parametros para el cálculo del daño sísmico.

De acuerdo con en el modelo de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de *Campos* (1992), la primera etapa para la elaboración del escenario de pérdidas en caso de terremoto, es la evaluación de la amenaza sísmica. Esta se puede determinar a partir de la intensidad, la magnitud, la aceleración del sismo, entre otros, en tanto sea relativamente probable y lo suficientemente alto para que cause daño. Igualmente, se advierte acerca de la no conveniencia de emplear sismos de gran intensidad o sismos de poca intensidad.

Además, define que para la determinación del grado de amenaza a la que están expuestas las ciudades o regiones, es preciso tener en cuenta la sismicidad regional, la recurrencia de magnitudes, la localización de las fallas cercanas y su relación con la actividad sísmica. De acuerdo con lo anterior, para propósitos del presente trabajo, se toman en cuenta los resultados de amenaza sísmica para Colombia, definidos en la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98.

8.3.1.2 Definición de las hipótesis de sismo.

Como las intensidades son medidas de daños y están muy relacionados con las aceleraciones causadas por las ondas sísmicas, se determino a partir de la ecuación dada por Richter en 1958, las relaciones aproximadas entre las intensidades sísmicas con los valores de aceleración y magnitud mostradas en el Capítulo 5 tabla 15. En ese orden de ideas se tuvieron en cuenta dos

parámetros básicos para la selección de las hipótesis de sismo, el primero, corresponde a la aceleración pico efectiva del terreno **Aa** y el segundo la intensidad **I**.

De acuerdo con el análisis anterior se pudo establecer que para intensidades del orden de VII en la Escala de Mercalli Modificada MM, se obtienen aceleraciones alrededor del 7 % de g, en un rango de magnitudes entre 5,5 a 6,1. Para intensidades del orden mencionado las edificaciones que generalmente resultan más afectadas corresponden a construcciones tipo D, que se caracterizan por ser construcciones con base en materiales pobres y de baja calidad, como el adobe, presentando daños considerables en su estructura.

El primer valor hipotético de sismo que se propone para la estimación de daños en el barrio San Antonio corresponde a un sismo con aceleración **Aa = 0.07 g**; las otras dos hipótesis corresponden a sismos con una aceleración de **Aa = 0.17 g** de intensidad VIII, con magnitudes en un rango de valores entre 6,1 a 6,7, y a una aceleración **Aa = 0,25 g** de intensidad IX y magnitudes en un rango de valores entre 6,7 a 7,3. Este último valor de aceleración corresponde al sismo de diseño adoptado para la ciudad de Cali en la NSR-98.

8.3.1.3 Definición del espectro

De acuerdo con la NSR-98, la ciudad de Cali se encuentra localizada en una zona de alta amenaza Sísmica, con un parámetro de aceleración pico efectiva $A_a = 0.25$ g, el cual corresponde a la aceleración horizontal del sismo de diseño y representa un porcentaje de la aceleración de la gravedad, con un periodo de retorno de 475 años, para una vida útil de 50 años y una probabilidad de excedencia del 10 % (figura 128).

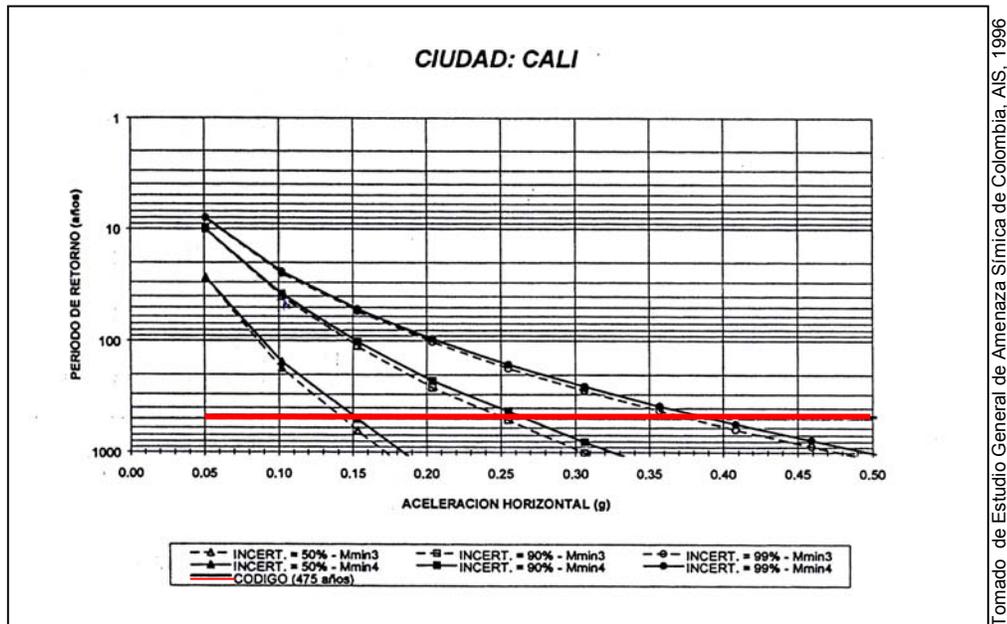


Figura 128. Curva de recurrencia de periodo de retorno de aceleraciones.

Según *Campos* (1992), los espectros asociados al movimiento del terreno dependen de las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de los depósitos del suelo (los cuales pueden generar efectos locales), además de la magnitud del sismo la fuente sismogénica, la distancia hipocentral y epicentral que se referencia para el estudio.

Se considera que los sismos cercanos se caracterizan por los periodos cortos con un amplio rango de frecuencias, por lo que el espectro de respuesta tiende a presentar amplitudes importantes para periodos pequeños que puede significar de acuerdo con *Campos* (1992), que las edificaciones de alturas de uno y dos pisos construidas en mampostería se caracterizan por tener periodos cortos en un rango aproximado de 0.1 s a 0.2 s, lo que las hace muy susceptibles a sismos de periodos cortos, a diferencia de los sismos lejanos caracterizados por periodos en un rango bajo de frecuencias predominando periodos altos (*Campos*, 1992).

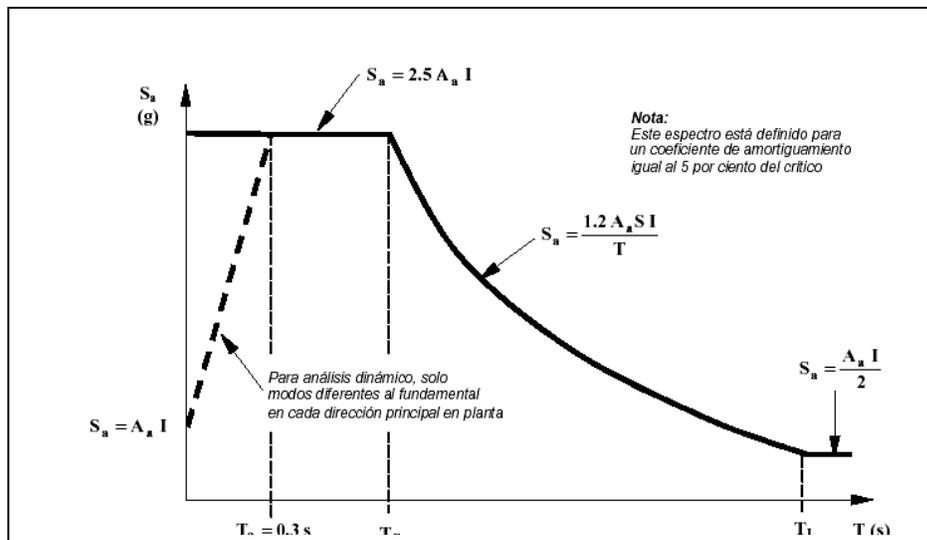


Figura 129. Espectro elástico de diseño NSR-98

8.3.1.4 Cálculo de la categoría de daño sísmico.

Para el cálculo del daño sísmico de las edificaciones del barrio San Antonio se procedió a determinar la resistencia a cortante menos favorable considerando la menor longitud total de muros en el primer piso, el espesor y la resistencia a cortante según al tipo de estructura. Se obtuvo el peso de la edificación y posteriormente se calculó el coeficiente sísmico resistente CSR. Se determinó el valor del coeficiente sísmico exigido CSE, a partir del espectro de respuesta dado por el código en la NSR-98. Se estimó la demanda de ductilidad y se comparó con la capacidad de ductilidad de la edificación, a partir del cual se establece la categoría o grado de daño para tres hipótesis de sismo con una aceleración A_a de 0.25g, A_a de 0.17g y A_a de 0.07g. Teniendo en cuenta las características espectrales para la ciudad de Cali definidas en el NSR-98.

1. Cálculo del coeficiente sísmico exigido CSE

Para el cálculo del coeficiente sísmico exigido CSE se realiza a partir de la siguiente ecuación tomada de la NSR-98.

$$S_a = 2.5 \times A_a \times I$$

Donde:

S_a = aceleración espectral.

A_a = aceleración piso efectiva.

I = coeficiente de importancia.

Para propósitos del trabajo la aceleración espectral **S_a** es equivalente al **CSE**.

Tabla 24. Valores de S_a o CSE para las tres hipótesis de aceleración pico efectiva A_a .

A_a	I	S_a
0.25 g	1	0.625
0.17 g	1	0.425
0.07 g	1	0.175

2. Cálculo del coeficiente sísmico resistente CSR.

Para el cálculo del CSR, se procedió a determinar el peso de la edificación (W), a partir de la obtención de las áreas construidas de las edificaciones, las cuales se determinaron con base en un mapa de división predial del barrio. El número de pisos y el estilo arquitectónico se obtuvo del estudio elaborado por la *SMP* (1998) y los datos referentes al tipo de material de los muros con espesores y alturas, a demás del tipo cubierta, fueron obtenidos de la inspección visual realizada en el trabajo de campo y de las investigaciones realizadas sobre las técnicas constructivas y materiales utilizados en la construcción de edificaciones populares en la ciudad. Los valores como densidades y pesos promedios de muros, cubiertas y entrepisos se tomaron de los valores utilizados por *Campos* (1992) y de *Escobar et.,al* (1998).

Tabla 25. Tipo de cubiertas y peso asociado

Tipo de cubierta	Característica	Peso ton/m ²
Cubiertas pesada	Conformada por una placa de concreto reforzada maciza o aligerada y cualquier tipo de acabado.	0.3
	Conformada por teja de barro, con estructura de soporte y cielo raso.	0.09
	Conformada por teja de barro y teja de asbesto cemento.	0.1
Cubierta moderada	Conformada por teja de asbesto-cemento, con estructura de soporte y cielo raso.	0.06
Cubierta liviana	Conformada por hojas de zinc o latón, con estructura de soporte y cielo raso.	0.03

Fuente: Tomado de Campos (1992).

Tabla 26. Densidad de muros

Material de muros	Densidad ton/m ³
Mampostería en adobe	1.99
Mampostería en ladrillo	1.8

Fuente: Escobar et., al (1998).

Debido a la imposibilidad de obtener los planos arquitectónicos de toda las edificaciones objeto de estudio para el calculo de longitudes y áreas de muros, se procedió a analizar 50 levantamientos elaborados por los estudiantes de la Universidad del Valle al interior del barrio, de los cuales se obtuvo información sobre la longitud total de muros en las dos direcciones principales (X) y (Y).

Con base en lo anterior y para propósitos de este trabajo para la muestra de predios con planimetría y levantamientos arquitectónicos, se procedió a calcular el valor medio de las longitudes de muros en las dos direcciones mediante en una regresión estadística. Estos valores se extrapolaron a las demás edificaciones evaluadas considerando en cada caso el área construida y su relación largo/ancho encontrándose los siguientes valores.

$$L_{tx} = 4.9 a$$

$$L_{ty} = 2.7 L$$

Donde:

L_{tx} = Longitud total de muros en la dirección x.

L_{ty} = Longitud total de muros en la dirección y.

a = longitud de la edificación en la dirección x.

L = longitud de la edificación en la dirección y.

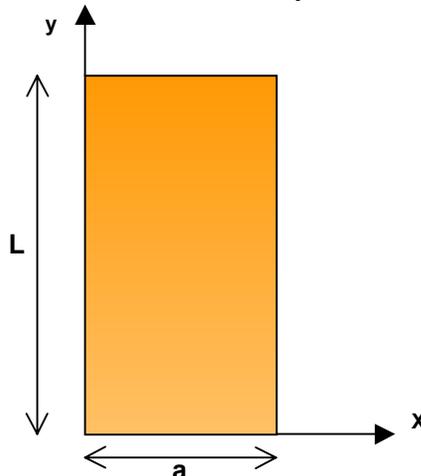


Figura 130. Direcciones principales de la edificación.

Con estos valores se calcularon las áreas de los muros, además de su peso, que sumado al peso de la cubierta se obtuvo el peso total de la edificación. Por último se calculó el valor del CSR en la dirección más desfavorable, es decir en la dirección que posee una longitud total de muros menor, y que resulto ser para todas las edificaciones la dirección en el eje Y. Para este calculo se tuvo en cuenta el valor del cortante resistente de los muros, que par edificaciones de MC es del orden de 15 ton/m² y para edificaciones de MNC es de 7.5 ton/m² de acuerdo con los ensayos para muros de mampostería del Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes (1990), en *Campos* (1992). La VR y el CSR se determinaron mediante la siguientes expresiones:

$$VR = (L) \times (e) \times (v)$$

Donde:

VR = Cortante resistente.

L= longitud total de muros en una dirección.

e = Espesor de los muros.

v = Valor de resistencia a cortante de los muros.

$$CSR = W/VR$$

Donde:

CSR = Coeficiente sísmico resistente.

W = Peso total de la edificación.

VR = Cortante resistente

Vale la pena resaltar que muchas de las edificaciones estudiadas poseían un confinamiento parcial de la mampostería, por lo cual se asumió un valor de cortante resistente de muro de 10 ton/m² que equivale aproximadamente al 66 % de la resistencia que tendría una edificación totalmente confinada.

3. Calculo de la ductilidad.

A partir de los resultados obtenidos de CSE y el CSR, se procedió a calcular el valor de la ductilidad a partir de la siguiente relación.

$$DD = CSE/CSR$$

Donde:

DD = Demanda de ductilidad.

CSE = Coeficiente sísmico exigido.

CSR = Coeficiente sísmico resistente.

Estos resultados se compararon con los valores establecidos para la categorización de daño sísmico en las edificaciones de mampostería, propuestos por *Hurtado* (1990) en la tabla 15.

8.3.2 Analisis y resultados

Las posibles causas que pueden generar daño sísmico en las edificaciones de mampostería de uno y dos pisos en el barrio San Antonio y que se mencionan a continuación, son el resultado de las investigaciones realizadas por parte del autor de este trabajo, con base en el análisis de las técnicas constructivas tradicionales y contemporáneas, que han marcado el desarrollo urbano de la ciudad en materia de vivienda popular y las enseñanzas aportadas por terremotos anteriores, donde este tipo de viviendas han resultado ser las mas afectadas.

De acuerdo con lo anterior se determinaron las posibles causas de daño sísmico por estilo arquitectónico, debido a que cada uno de ellos obedece a materiales, técnicas y formas constructivas de una época, que es necesario tener en cuenta para identificar los elementos más susceptibles a sufrir o generar daño. En este sentido el autor introduce el **estilo arquitectónico** como un nuevo elemento a tener en cuenta en los estudios de vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes, para ser utilizado en especial en zonas antiguas o centros históricos en donde por sus características urbanas, coexisten una serie de manifestaciones arquitectónicas, que es necesario diferenciar para un mejor entendimiento de comportamiento sísmico de las edificaciones y sus posibles fallas.

Tabla 27. Causas de daño sísmico por estilos arquitectónicos

Tradición Colonial	Republicano	Ecléctico	Moderno popular
1. Falta de mantenimiento. 2. Falta de confinamiento de muros 3. Adiciones de muros en otros materiales. 4. Cubiertas pesada en el caso de la teja de barro. 5. Cimentación deficiente. 6. Mala calidad del adobe y del mortero de pega en muros. 7. Erosión de los muros de adobe, por exposición al medio ambiente y a la humedad. Amarres deficientes entre cubiertas y muros	1. Amarres deficientes entre cubiertas y muros. 2. Falta de mantenimiento. 3. Falta de confinamiento de muros 4. Adiciones de muros en otros materiales. 5. Cubiertas pesada en el caso de la teja de barro. 6. Cimentación deficiente 7. Gran peso de la edificación especialmente en viviendas de 2 pisos 8. Mayor porcentaje de aberturas en muros. 9. Irregularidad en planta. 10. Anclaje de elementos decorativos como cornisas y adornos 11. Erosión de los muros de adobe, por exposición al medio ambiente y a la humedad	1. Amarres deficientes entre cubiertas y muros. 2. Falta de mantenimiento. 3. Falta de confinamiento de muros 4. Adiciones de muros en otros materiales. 5. Cubiertas pesada en el caso de la teja de barro. 6. Cimentación deficiente. 7. Falta de amarres y estabilidad de áticos, cornisas y adornos. 8. Baja calidad del mortero de pega de la mampostería con argamasa (cal + arena) Gran peso de la edificación, especialmente en viviendas de 2 pisos	1. Amarres deficientes entre cubiertas y muros. 2. Falta de mantenimiento. 3. Falta de confinamiento de muros 4. Cubierta pesada en el caso de la teja de barro y losas. 5. Cimentación deficiente. 6. Falta de amarres y estabilidad de áticos, antepechos y culatas. 7. Gran peso de la edificación, especialmente en viviendas de 2 pisos 8. Irregularidad en planta 9. Irregularidad en altura 10. Baja calidad del mortero de pega de la mampostería 11. Elementos de fachada sueltos 12. Debilitamiento de muros debido a gran cantidad de aberturas

Las siguientes figuras muestran la distribución de las categorías de daño sísmico que podrían presentarse al interior del barrio en las edificaciones de uno y dos pisos de mampostería para los tres sismos hipotéticos planteados para el desarrollo de este trabajo. Estos se muestran en las figuras 131, 132 y 133.

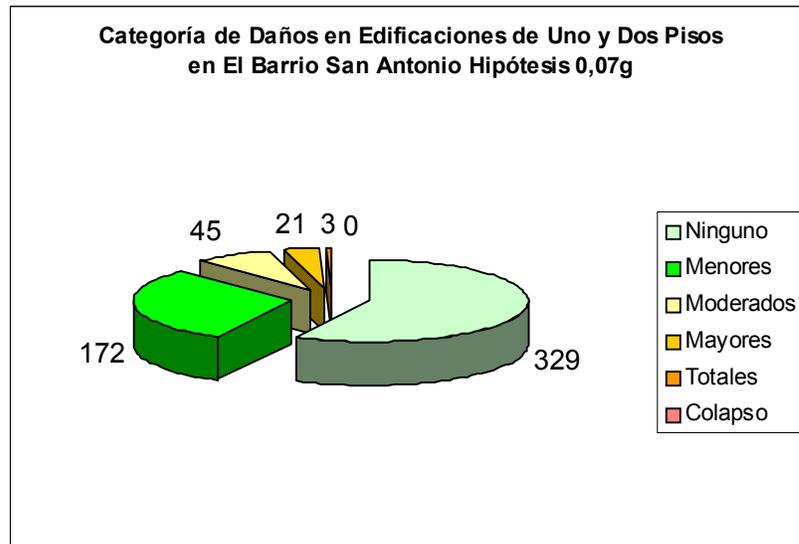


Figura 131. Distribución del daño sísmico para $A_a = 0,07$ g

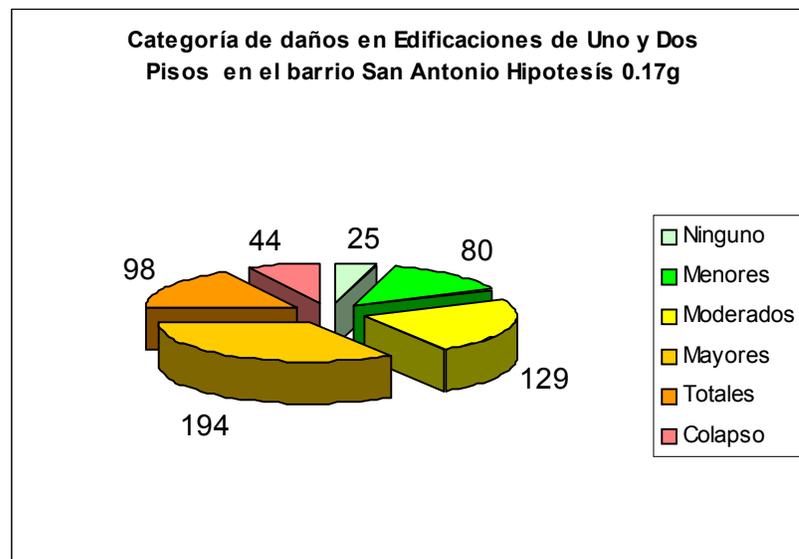


Figura 132. Distribución del daño sísmico para $A_a = 0,17$ g

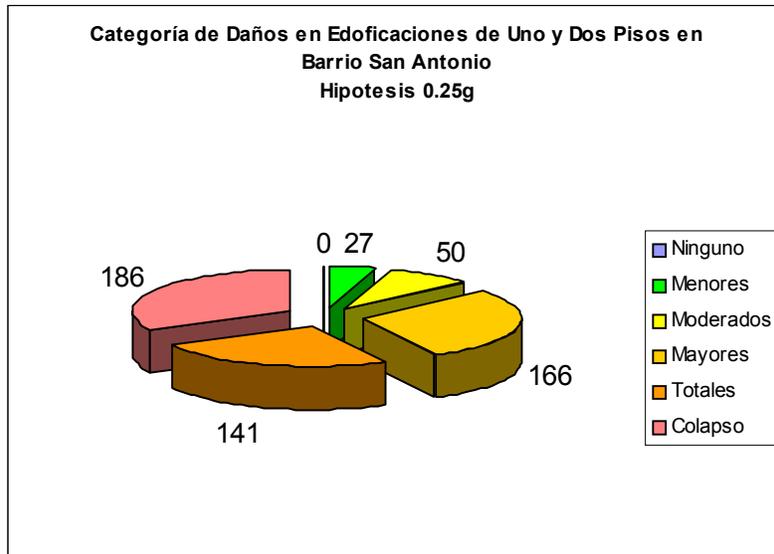


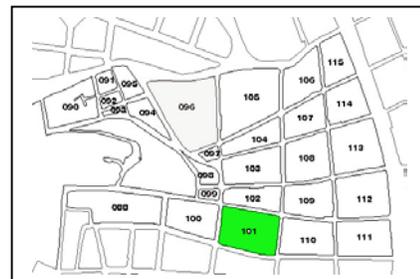
Figura 133. Distribución del daño sísmico para Aa 0,25 g

8.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DAÑO SÍSMICO DE UNA EDIFICACIÓN

8.4.1 Recolección de información



Edificación a evaluar: Calle 2 N° 10-43



Localización de la manzana: 101



Localización del Predio: 101-038

Información General

Estilo arquitectónico: Tradición Colonial.

Número de pisos: uno.

Uso: Residencial.

Año de construcción: Antes de 1950.

- **Aspectos constructivos**

Material de muros: adobe.

Tipo de cubierta: teja de barro.

Tipo de entepiso: no tiene.

- **Aspectos estructurales**

Sistema estructural: Mampostería no confinada (MNC).

- **Aspectos de mantenimiento**

Estado de conservación: Malo.

- **Aspectos geométricos**

Configuración en altura: regular.

Configuración en planta: regular.

- **Aspectos del entorno**

Tipo de suelo: firme.

Topografía: plana.

- **Aspectos no estructurales**

Elementos vulnerables: Alero.

8.4.2 Determinación de la vulnerabilidad sísmica.

Tabla 28. Calificación de indicadores de vulnerabilidad

Num	Indicadores de Vulnerabilidad	Grado de Vulnerabilidad Sísmica		
		Alto	Moderado	Bajo
1	Época de Construcción	50	***	***
2	Sistema estructural	50	***	***
3	Geometría			
3.1	Configuración en planta	***	***	5
3.2	Configuración en altura	***	***	5
4	Peso			
4.1	Número de pisos	***	***	5
4.2	Tipo de cubierta	50	***	***
5	Rigidez			
5.1	Tipo de mampostería	50	***	***
5.2	Espesor de muros	***	***	5
5.3	Cantidad de muros	***	25	
5.4	Altura de muros	***	***	5
6	Elementos no estructurales	50	***	**
7	Suelo y cimentación			
7.1	Coefficiente de sitio	***	***	5
7.2	Terreno de fundación	***	***	5
7.3	Posición del edificio y la cimentación	***	25	***
8	Estado de conservación	50	***	***
Calificación Total		300	50	35

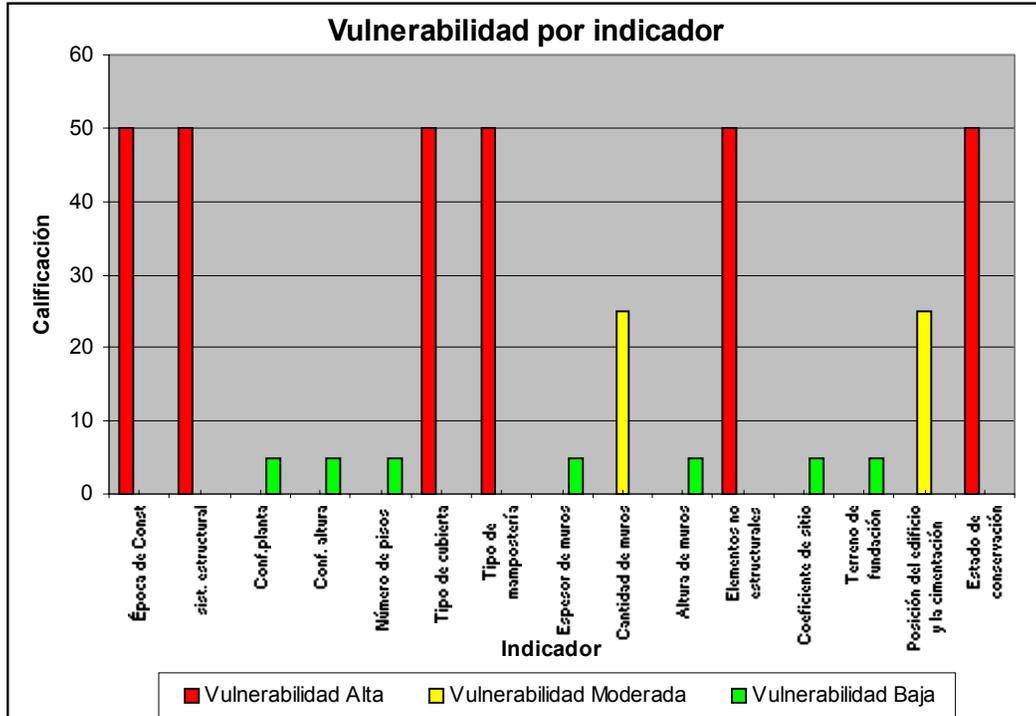


Figura 134. Comparación de la influencia de los indicadores de vulnerabilidad en la edificación.

En el gráfico anterior se muestra el análisis de sensibilidad de los indicadores estudiados, teniendo mayor incidencia la época de construcción, el sistema estructural, el tipo de cubierta, el tipo de mampostería, los elementos no estructurales y el estado de conservación de la edificación.

8.4.3 Determinación de la categoría de daño sísmico

1. Calculo del peso de la edificación (W).

DATOS DE ENTRADA

Área del predio	176.25 m ²
Área libre	26,5 m ²
Área construida	150 m ²
Peso de cubierta de teja de barro	0,09 ton/ m ²
Espesor promedio de muros	0.40 m
Altura promedio de muros	3,5 m
Peso de muros	1,99 ton/m ³

DATOS DE SALIDA

Peso total cubierta	13.5 ton
Área total de muros	317,63 m ²
Peso total de muros	214,90 ton
Peso total de la edificación (W)	228,40 ton

2. Calculo del coeficiente sísmico resistente (CSR).

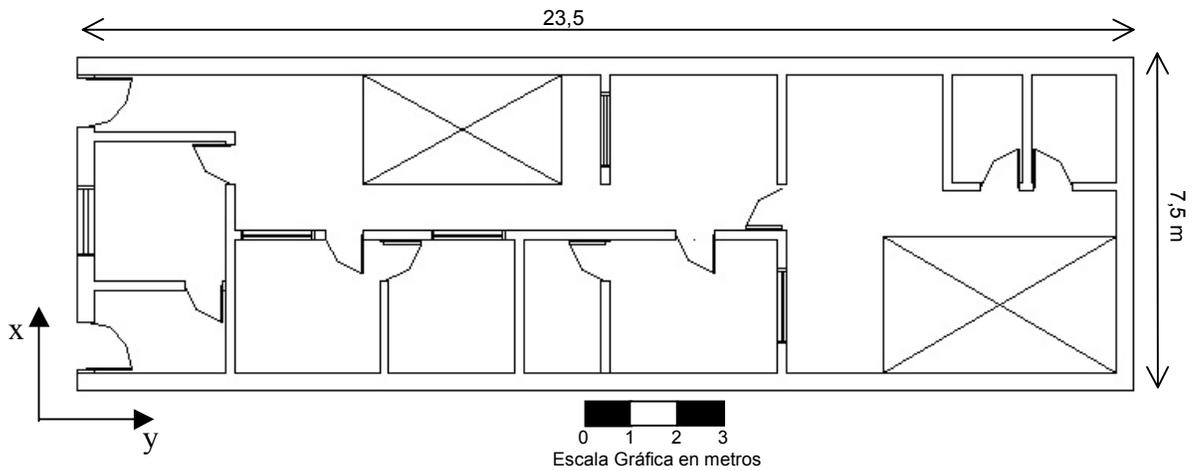


Figura 135. Planta arquitectónica de la edificación.

DATOS DE ENTRADA

Longitud total de muros en la dirección x	-----	L _{tx} = 36.8m
Longitud total de muros en la dirección y	-----	L _{ty} = 54 m
Resistente al cortante de la mampostería sin confinar (v)	-----	7.5 ton/m ²
Espesor promedio de muros (e)	-----	0.40 m
Peso total de la edificación (W)	-----	228,40 ton

$$VR = (L) \times (e) \times (v)$$

Cortante resistente de muros en la dirección x-----VRx =110.3 ton
Cortante resistente de muros en la dirección y -----VRy =162 ton

Del resultado anterior se toma el valor mas bajo, es decir el que corresponde a la cortante mas desfavorable en este caso VRx=110,3 ton

El calculo de CSR esta determinado por la siguiente expresión:

$$CSR = (VR) / (W)$$

Entonces el coeficientes sísmico resistente CSR = 0,483

3. Calculo del coeficiente sísmico exigido CSE.

$$Sa = 2.5 \times Aa \times I$$

Donde:

Sa = aceleración espectral.

Aa = Aceleración pico efectiva

I= Coeficiente de importancia (por tratarse de viviendas su valor es 1)

Coeficiente sísmico exigido (CSE) para **Aa = 0,25 g**----- 0,625

Coeficiente sísmico exigido (CSE) para **Aa = 0,17 g**----- 0,425

Coeficiente sísmico exigido (CSE) para **Aa = 0,17 g**----- 0,175

4. Calculo de la de la demanda de ductilidad DD.

DATOS DE ENTRADA

Coefficiente sísmico exigido CSE.

Coefficiente sísmico resistente CSR.

El valor de la demanda de ductilidad se calcula como:

$$DD = CSE / CSR$$

DATOS DE SALIDA

Demanda de ductilidad (DD) para Aa = 0,25 g -----1,29

Demanda de ductilidad (DD) para Aa = 0,17 g-----0,88

Demanda de ductilidad (DD) para Aa = 0,07 g -----0,36

5. Determinación de la categoría de daño sísmico.

Comparando los valores de la Demanda de ductilidad con los propuestos por Hurtado (1990) en la tabla 15 Capítulo 5 se obtienen las siguientes categorías de daños:

Categoría de daños para 0,25 g----- Mayores.

Categoría de daños para 0,17 g----- Moderados.

Categoría de daños para 0,07 g----- Ninguno.

8.5 DETERMINACIÓN ESCENARIOS DE VULNERABILIDAD Y DAÑO SÍSMICO

8.5.1 Procedimiento

El procedimiento básico para la construcción de escenarios de vulnerabilidad o daño, se divide en tres partes fundamentales: entrada, procesamiento de la información y salida como se muestra en la figura (). Los datos de entrada son el resultado de la evaluación de vulnerabilidad sísmica y de la categorización de los daños que conforman la base de datos. El procesamiento de la información consiste georeferenciación de los datos de entrada mediante la utilización de un SIG. La salida consiste en la representación gráfica de los escenarios de vulnerabilidad y de daño sísmico, identificando los distintos niveles de valoración cromáticamente.

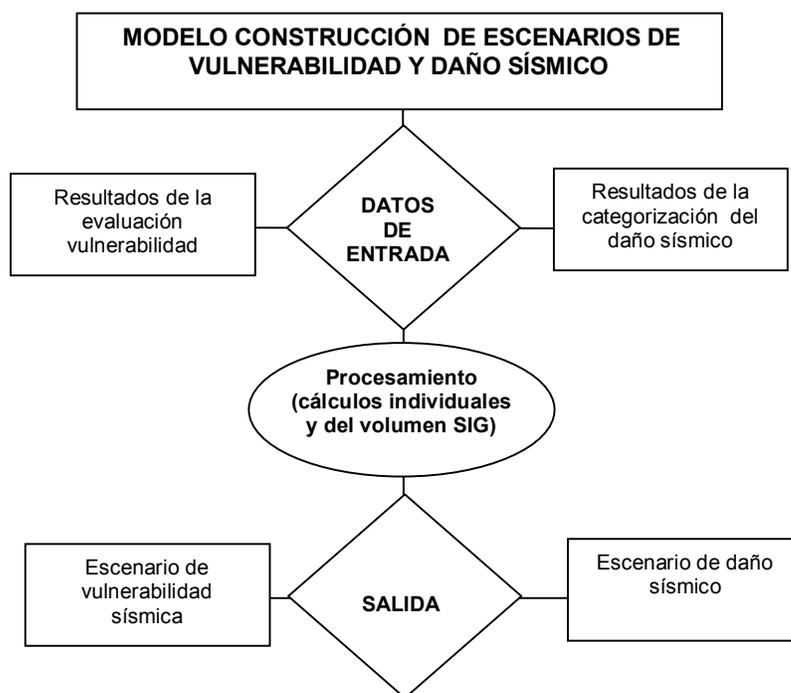


Figura 136. Elementos básicos para la determinación de escenarios.

La determinación de los escenarios de vulnerabilidad sísmica se realiza a partir de la identificación y calificación de una serie de parámetros o *indicadores de vulnerabilidad*, de acuerdo con la metodología desarrollada por el autor en el Capítulo 6. El procedimiento para la determinación de los posibles escenarios de daño sísmico se realiza mediante el cálculo de la demanda de ductilidad de las edificaciones, con base en el método de Hurtado (1990), descrito en el Capítulo 5, para estimar, clasificar y graficar los daños de manera cualitativa.

Los resultados obtenidos del cálculo de la vulnerabilidad y daño sísmico, se almacenan una tabla de Excell, que sirve como base de datos relacional, la cual se integra a un SIG - Sistema de Información Geográfica en **Mapinfo**, que permite construir los mapas que representan la distribución gráfica y espacial de los escenarios de vulnerabilidad de manera particular por cada uno de los indicadores estudiados y la vulnerabilidad física global; además de los escenarios hipotéticos de daño sísmico.

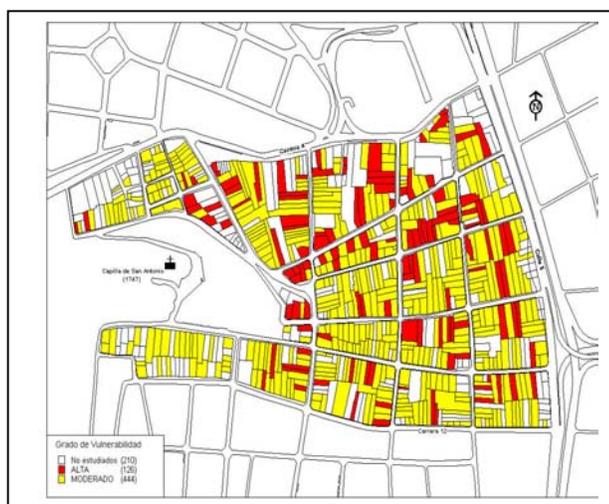


Figura 137. Representación gráfica de los resultados, elaborados en Mapinfo.

8.5.2 Determinación de los escenarios de vulnerabilidad sísmica

Para la estimación de los escenarios de vulnerabilidad sísmica del barrio San Antonio, se aplicó la metodología propuesta en este trabajo. Se evaluó de forma cualitativa los elementos susceptibles a sufrir ó generar daño. Los resultados de la evaluación cualitativa de los indicadores de vulnerabilidad para la construcción de los “Escenarios de Vulnerabilidad Sísmica” del barrio San Antonio se muestran a continuación:

8.5.2.1 Escenario de vulnerabilidad por época de construcción.

Por lo menos el 73 % de las edificaciones de uno y dos pisos estudiadas, se construyeron antes de 1950, y obedecen a tendencias arquitectónicas de tradición colonial, ecléctica y republicana. El 27% restante de las edificaciones se construyeron a partir de 1950, y obedecen a un estilo arquitectónico moderno.

De acuerdo con los resultados anteriores y con los criterios establecidos en la metodología, la mayoría de las edificaciones estudiadas en el barrio San Antonio presentan una **vulnerabilidad alta**, debido a que se construyeron antes de la vigencia del CCCSR-84.

Las edificaciones construidas antes de 1950 son las estructuras antiguas, de una época, en donde las practicas constructivas obedecían a técnicas edificatorias tradicionales, en las que al parecer no se tuvieron en cuenta consideraciones sismo resistentes.

Este grupo de edificaciones presenta características similares a las construcciones afectadas por terremotos anteriores, como el de Popayán (1983) y Cúcuta (1981). También a la antigüedad de las edificaciones y deterioro de sus materiales, se añaden errores de estructuración a la luz de las normas sísmicas vigentes, que son acentuados por al ser transformadas, por ejemplo mediante el cambio de uso, lo cual implica la mayoría de las veces, reformas, adiciones y mutilaciones.

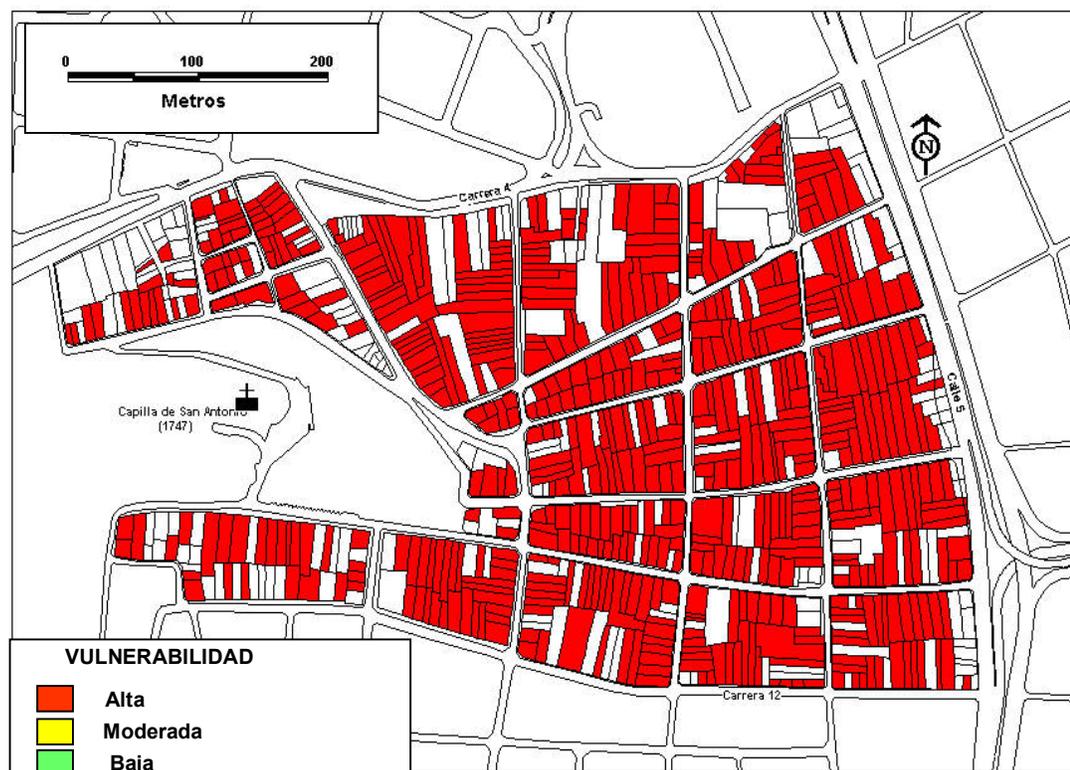


Figura 138. Indicador por época de construcción.

8.5.2.2 Escenario de vulnerabilidad por sistema estructural

Por lo menos el 75 % de las edificaciones presentan una tipología estructural de muros portantes en mampostería no confinada ni reforzada, calificando con una vulnerabilidad alta. El 25 % restante está constituido por edificaciones en mampostería parcialmente confinada, calificando con vulnerabilidad moderada.

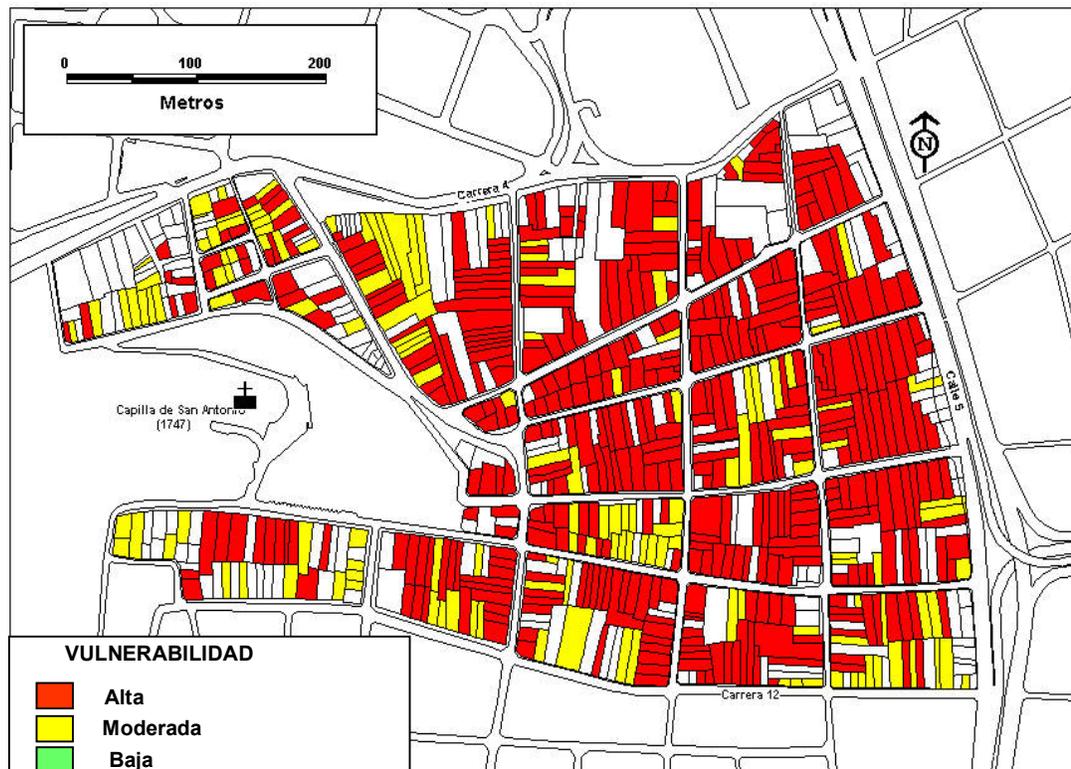


Figura 139. Indicador por sistema estructural.

8.5.2.3 Escenarios de vulnerabilidad por configuración geométrica.

1. Configuración en planta.

Alrededor de un 50 % de las edificaciones presentan irregularidad en planta, calificando con vulnerabilidad alta, y el otro 50 % son regulares, con una calificación de vulnerabilidad baja.

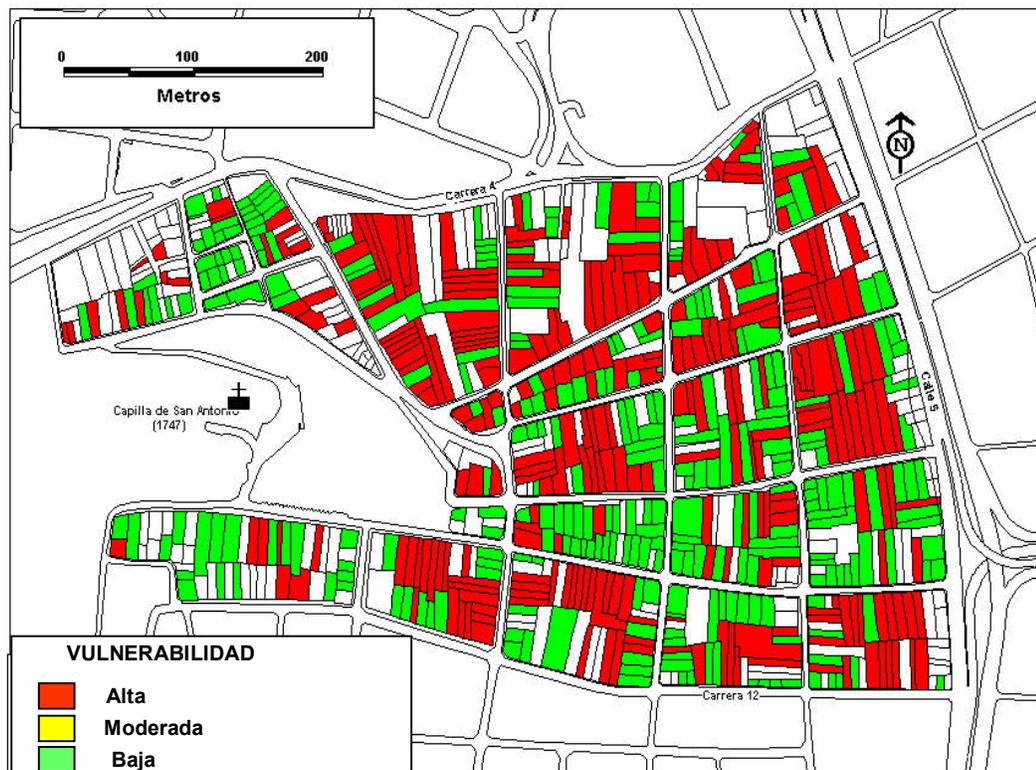


Figura 140. Indicador por configuración en planta.

2. Configuración en altura.

Se observó que más del 89 % de las edificaciones del barrio San Antonio son regulares en altura, calificando con una vulnerabilidad baja y el 11 % restante son irregulares, calificando con vulnerabilidad alta.

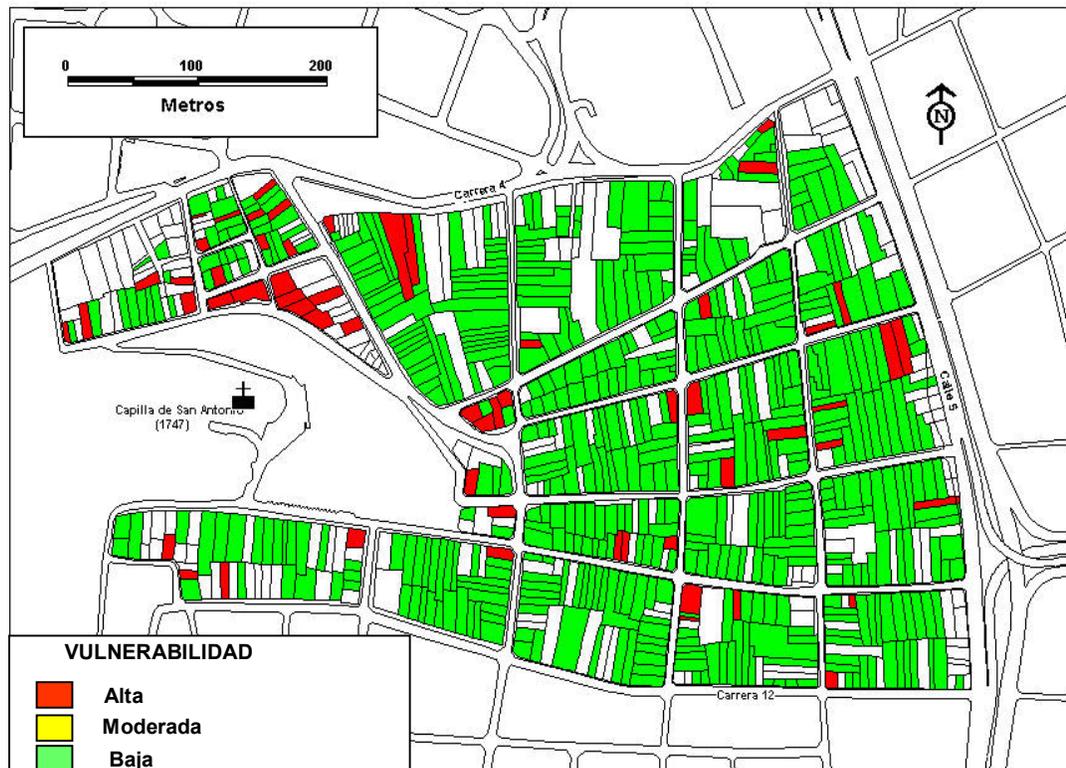


Figura 141. Indicador por configuración en altura.

8.5.2.4 Escenarios de vulnerabilidad por peso de la edificación.

1. Número de pisos.

Un 77 % de las edificaciones estudiadas corresponden a una altura de 1 piso, estas califican con una vulnerabilidad baja y el 33 % restante pertenecen a edificaciones de 2 pisos, con calificación moderada.

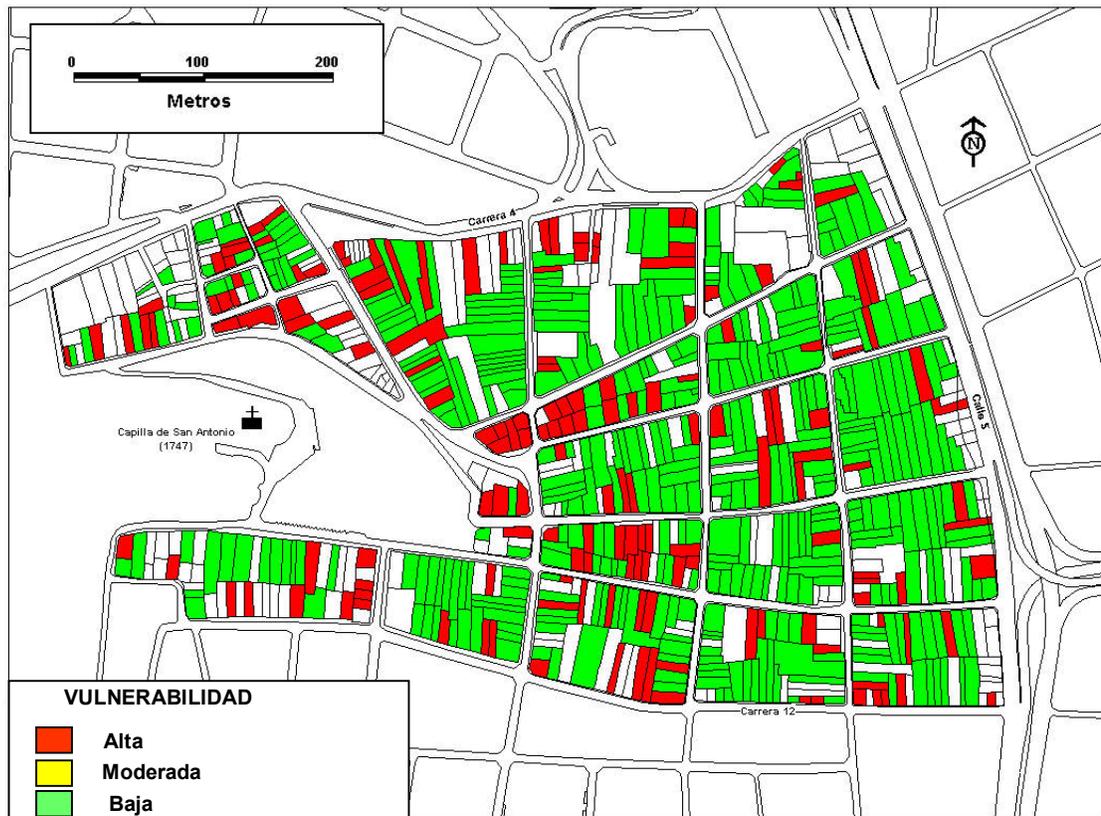


Figura 142. Indicador por número de pisos.

2. Tipo de cubierta.

Alrededor del 95 % de las edificaciones tienen cubierta pesada (un 8 % lo constituyen lasosas, un 1 % corresponde a la combinación de teja de barro y asbesto cemento y un 87 % lo constituyen las cubiertas en teja de barro). Por lo tanto califica con vulnerabilidad alta. Por lo menos el 4 % de las edificaciones tiene cubierta de peso medio y está compuesta por teja de asbesto cemento, con una calificación de vulnerabilidad moderada y el 1 % tiene cubierta liviana, compuesta por láminas de zinc, calificando con vulnerabilidad baja.

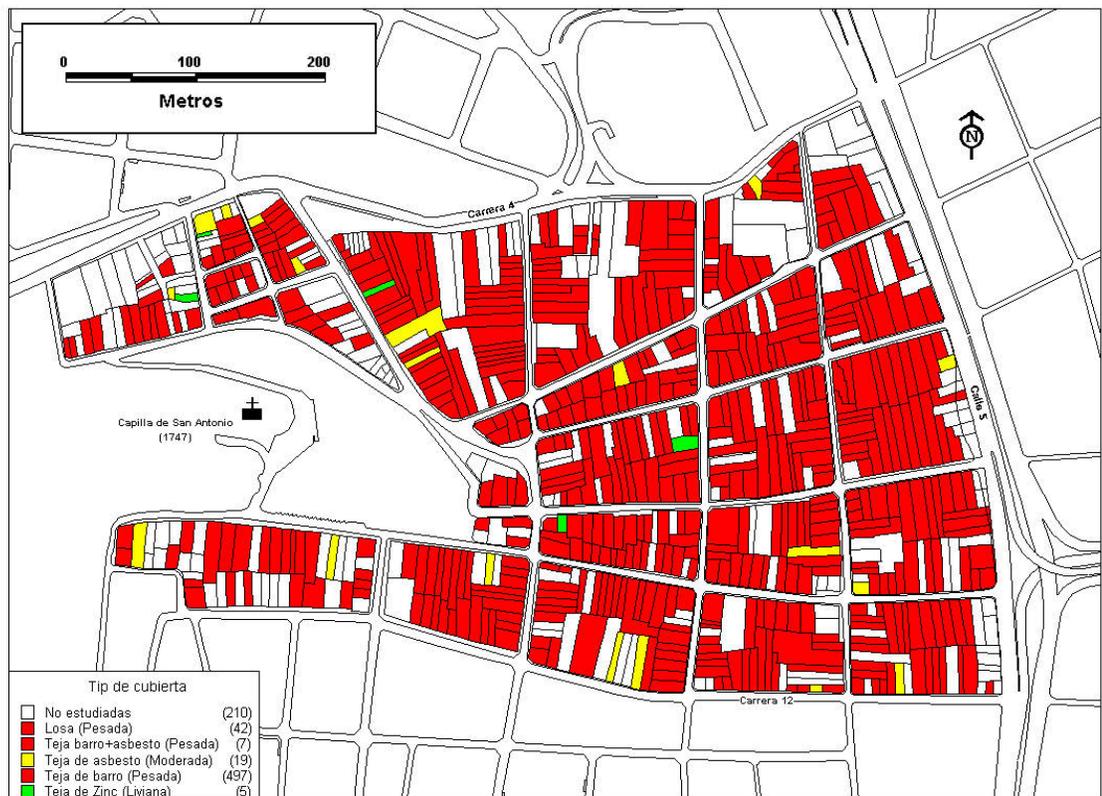


Figura 143. Indicador por tipo de cubierta.

8.5.2.5 Escenarios de vulnerabilidad por rigidez.

1. Tipo de mampostería.

Se puede decir que alrededor del 56 % de las edificaciones estudiadas están construidas en mampostería de ladrillo cocido, calificando con una vulnerabilidad baja. El 44 % restante de las edificaciones están construidas en mampostería de adobe, con una calificación de vulnerabilidad alta.

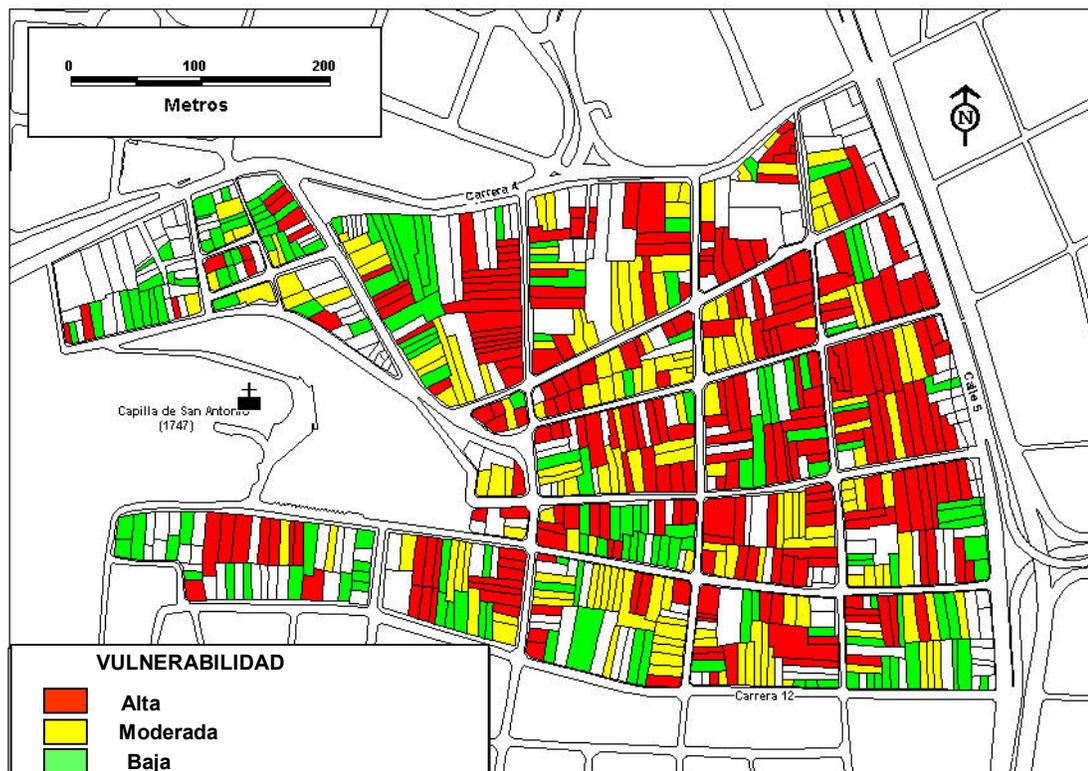


Figura 144. indicador por tipo de mampostería.

2. Espesor de muros.

Al menos un 56 % de los muros de las edificaciones estudiadas presentan espesores entre 15 y 40 cm calificando con una vulnerabilidad moderada. El 44 % restante pertenece a edificaciones de muros mayores a 40 cm, calificando con una vulnerabilidad baja.

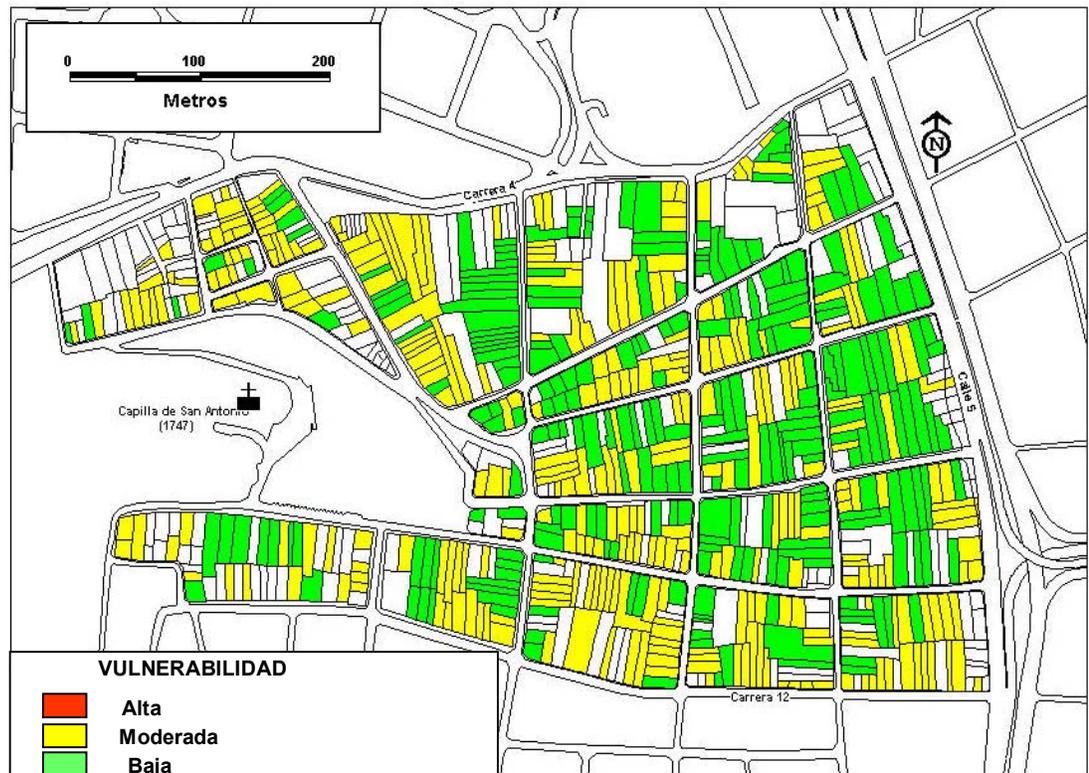


Figura 145. Indicador por espesor de muros.

3. Altura de muros.

En general el 100% de las edificaciones estudiadas presentan muros con una altura mayor 20 veces el espesor del muro, de acuerdo con las condiciones estipuladas para su calificación en la metodología propuesta para este trabajo, por lo tanto califica con vulnerabilidad baja.

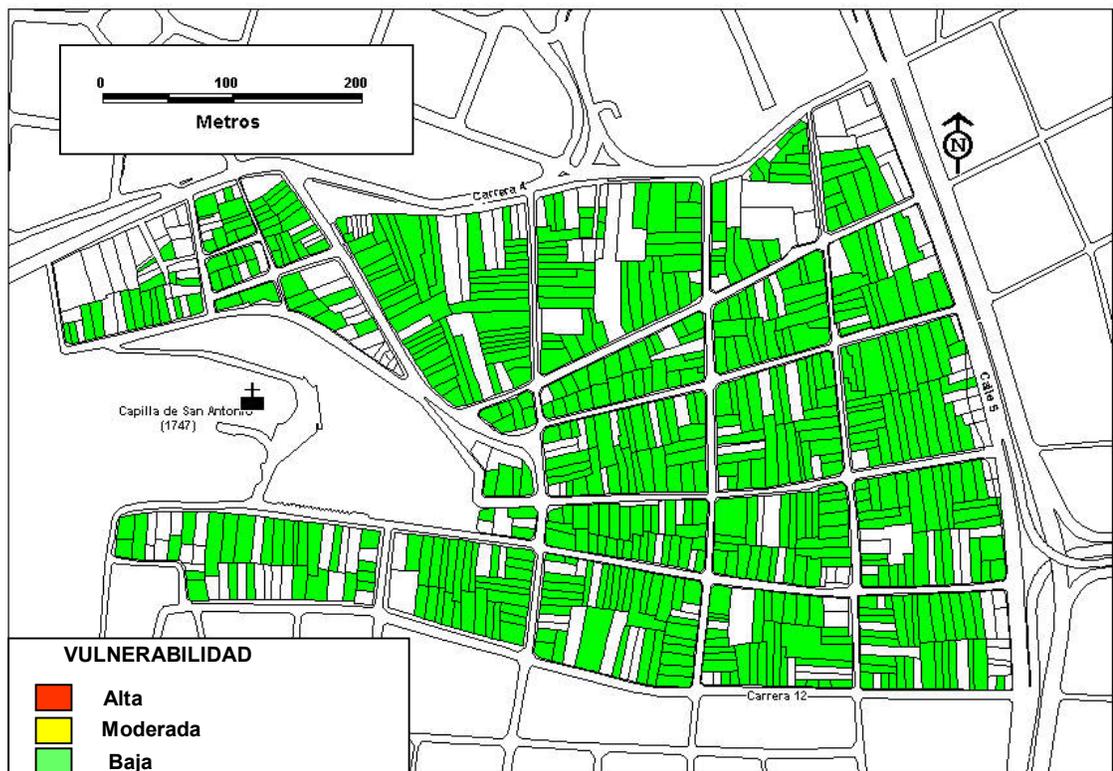


Figura 146. Indicador por altura de muros.

4. Cantidad mínima de muros.

Alrededor de un 74 % de las edificaciones cuenta con la cantidad suficiente de muros en las dos direcciones pero que no tienen ningún tipo de refuerzo, por lo tanto califica con una vulnerabilidad moderada. Por lo menos un 24 % también cuenta con una cantidad suficiente de muros en las dos direcciones y presentan algún tipo de refuerzo por lo tanto califican con vulnerabilidad baja. Un 2 % de las edificaciones presenta insuficiente numero de muros en alguna de sus 2 direcciones ortogonales, por lo tanto califican con una vulnerabilidad alta. Estos resultados se obtuvieron teniendo como base las extrapolaciones realizadas de longitudes de muros de los levantamientos arquitectónicos, desarrollados por los estudiantes de arquitectura de la Universidad del Valle.

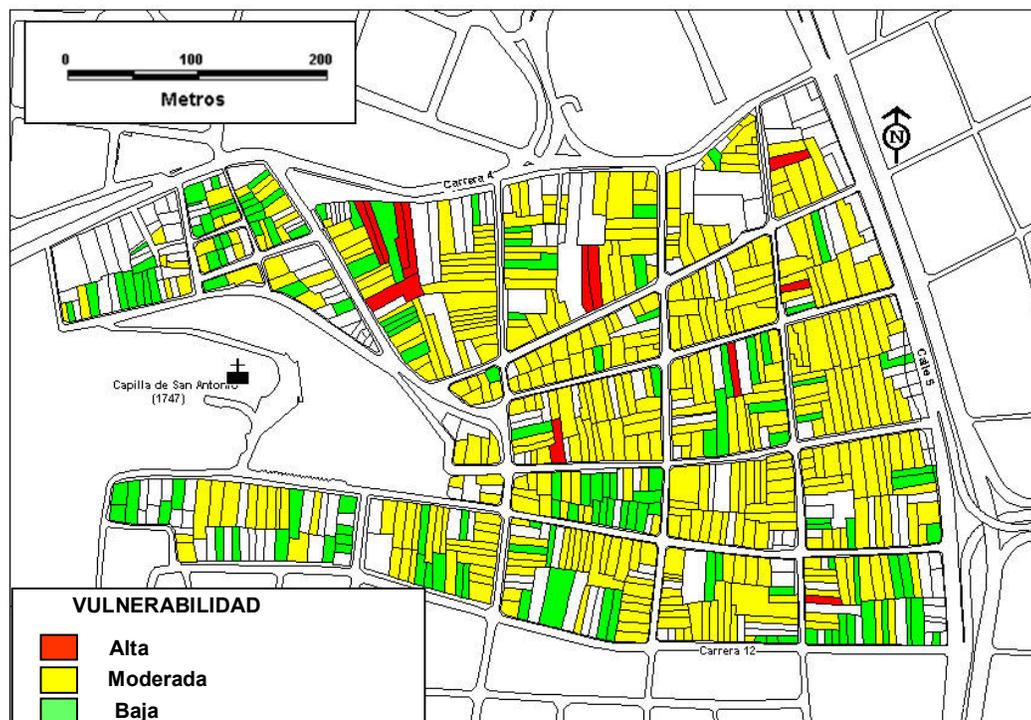


Figura 147. Indicador por cantidad de muros en las dos direcciones

8.5.2.6 Escenario de vulnerabilidad por elementos no estructurales.

Se identificó que un 50 % de las edificaciones del barrio presentan elementos vulnerables no estructurales tales como: cornisas, áticos, antepechos, adornos, aleros, balcones, entre otros, con la posibilidad de presentar falla frente a las acciones sísmicas. Por lo tanto califica con vulnerabilidad alta. El 50 % restante no presenta elementos no estructurales vulnerables, calificando con vulnerabilidad baja.

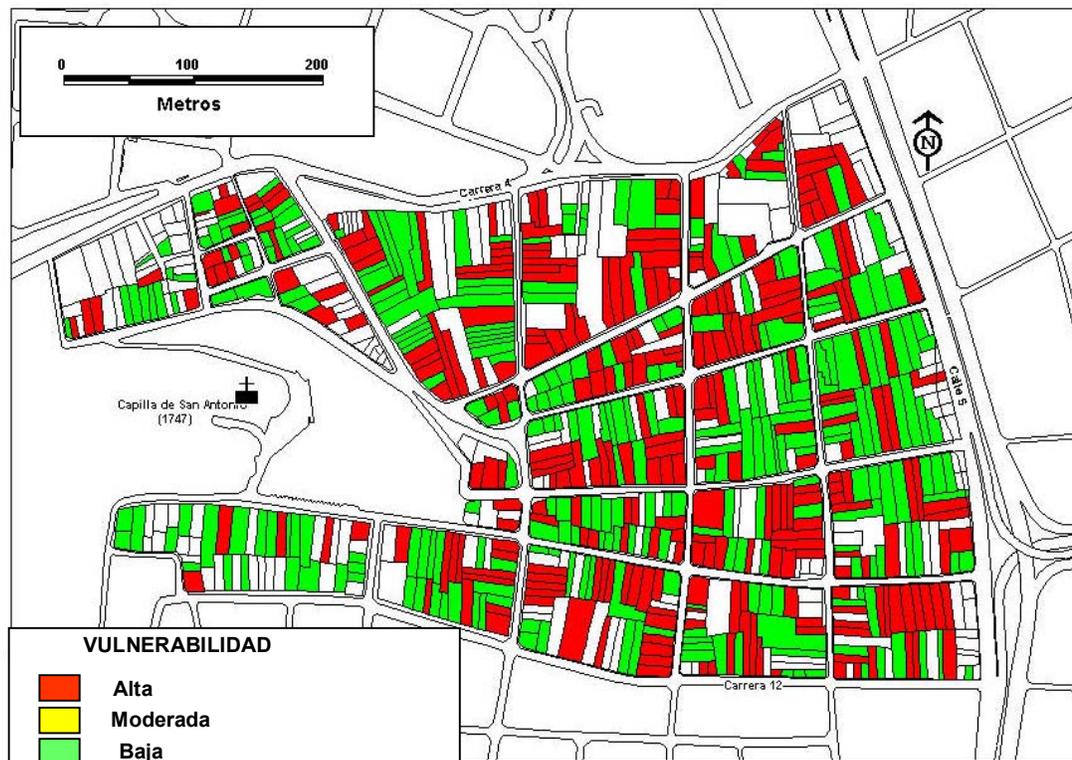


Figura 148. Indicador por elementos no estructurales.

8.5.2.7 Escenarios de vulnerabilidad por suelo y cimentación.

1. Coeficiente de sitio.

De acuerdo con los ensayos realizados por *Rosales* (2001) para la determinación del coeficiente sísmico mediante trepidaciones en el barrio San Antonio, y con el estudio realizado por el OSSO para la macrozonificación de los suelos de Cali, se puede decir que el 100% de las edificaciones estudiadas están asentadas sobre depósitos de suelo con un coeficiente de sitio S1, lo que significa que se descarta la posibilidad de amplificaciones sísmicas debido al suelo, por lo tanto, califica con vulnerabilidad baja.

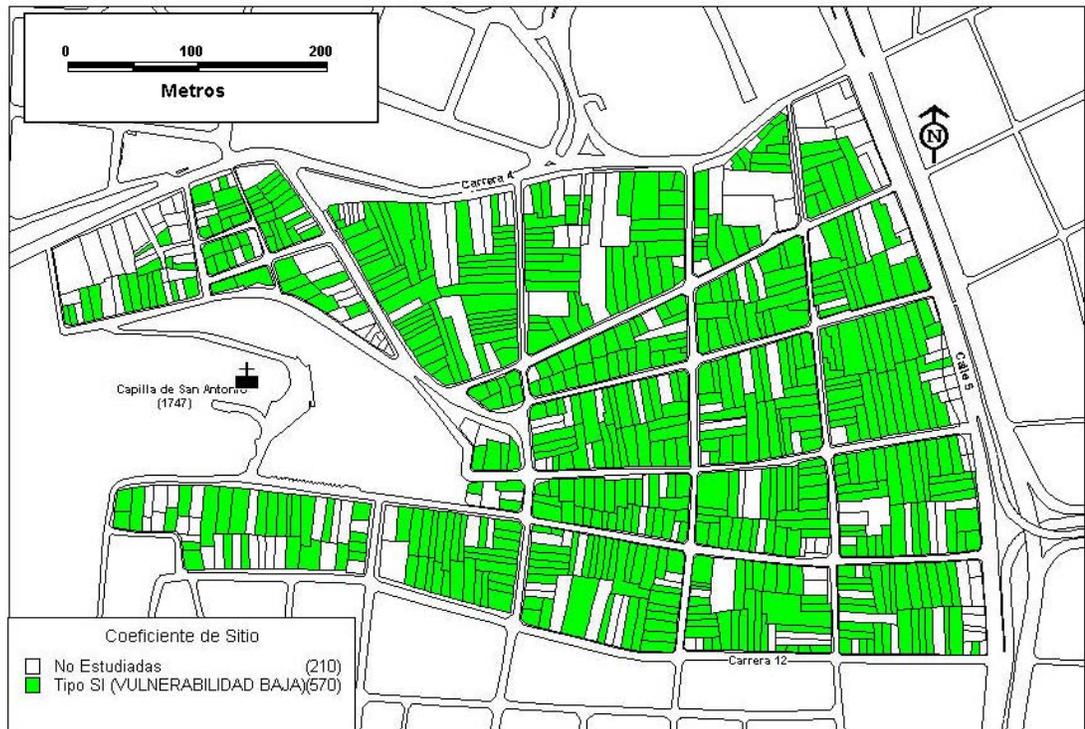


Figura 149. Indicador por coeficiente de sitio.

2. Terreno de fundación.

De acuerdo con las características geotécnicas del barrio, y a las observaciones realizadas en campo, así como a los distintos cortes estratigráficos que existen en el barrio, estudios de suelos y otros estudios realizados por el OSSO, se puede decir que el 100% de las edificaciones estudiadas están asentadas sobre un terreno firme y estable, en las zonas de alta pendiente.

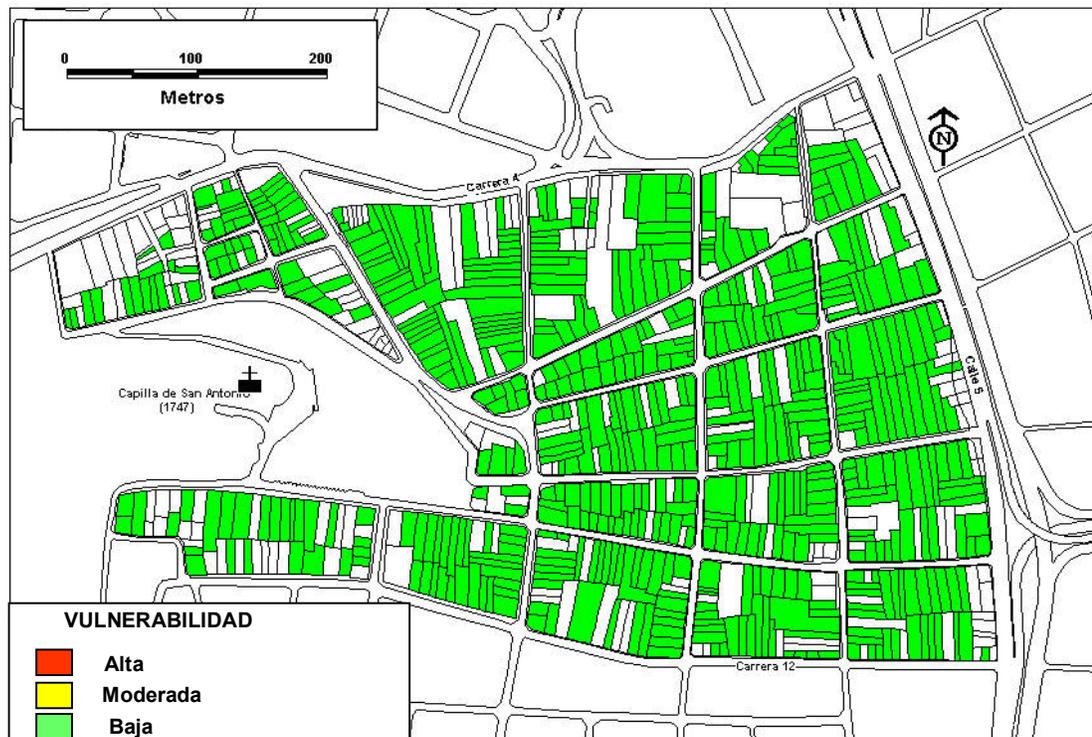


Figura 150. Indicador por terreno de fundación.

3. Posición del edificio y de la cimentación.

Alrededor de un 77 % de las edificaciones del barrio están localizadas sobre pendientes que no exceden el 30 %. Debido a la consistencia y firmeza del terreno se descarta un empuje desequilibrado de este, en las zonas donde las pendientes son mayores. No obstante, la mayoría de estas edificaciones presentan cimentaciones deficientes ya que fueron construidas antes de la expedición del CCCSR-1984, es decir, que en la cimentación por lo general, no se consideraban vigas de amarre y simplemente era ciclópea, por lo tanto, estas edificaciones califican con una **vulnerabilidad moderada**. El 23 % restante de las edificaciones presenta una condición óptima y califican con **vulnerabilidad baja**.

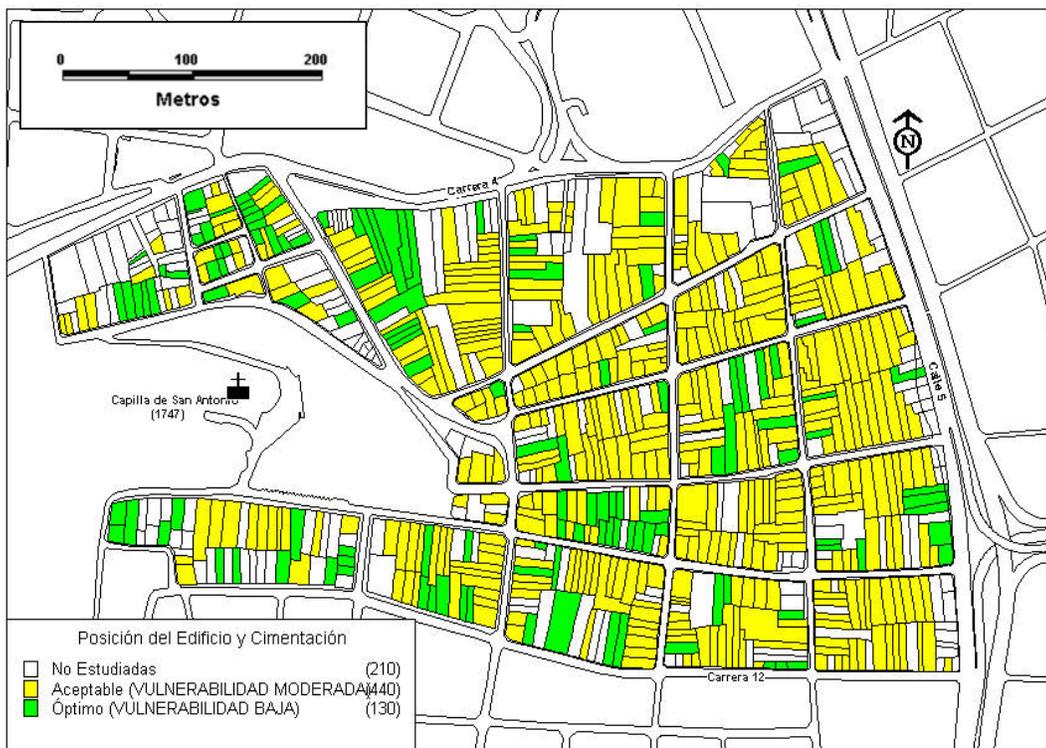


Figura 151. Indicador por posición del edificio y de la cimentación.

8.5.2.8 Escenario de vulnerabilidad por estado de conservación.

De acuerdo con la inspección realizada, se determinó que por lo menos un 60 % de las edificaciones del barrio San Antonio presentan un buen estado de conservación, un 35 % presenta un regular estado de conservación y el 5 % restante se encuentra en mal estado.

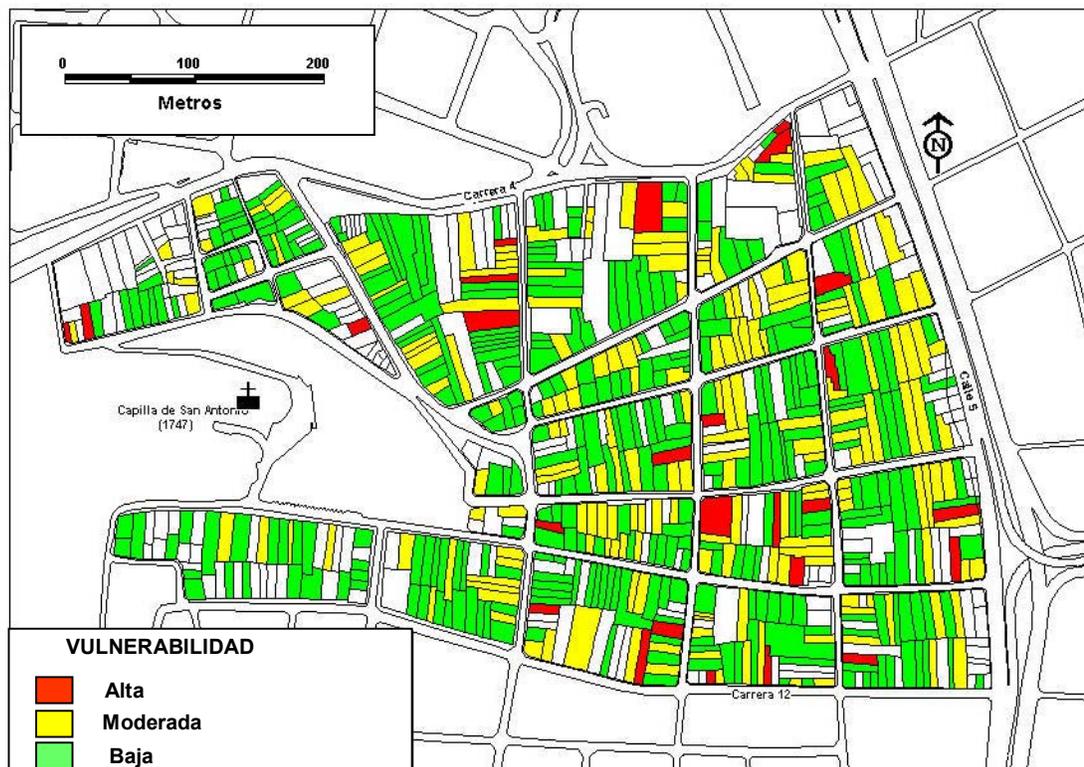


Figura 152. Indicador por estado de conservación.

8.5.2.9 Escenario de vulnerabilidad física-global o de conjunto.

De acuerdo con los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores de vulnerabilidad sísmica, se procedió al cálculo de la vulnerabilidad global y se estimó que alrededor del 78 % de las edificaciones de uno y dos pisos estudiadas presentan Vulnerabilidad Moderada y el 22 % restante vulnerabilidad alta.

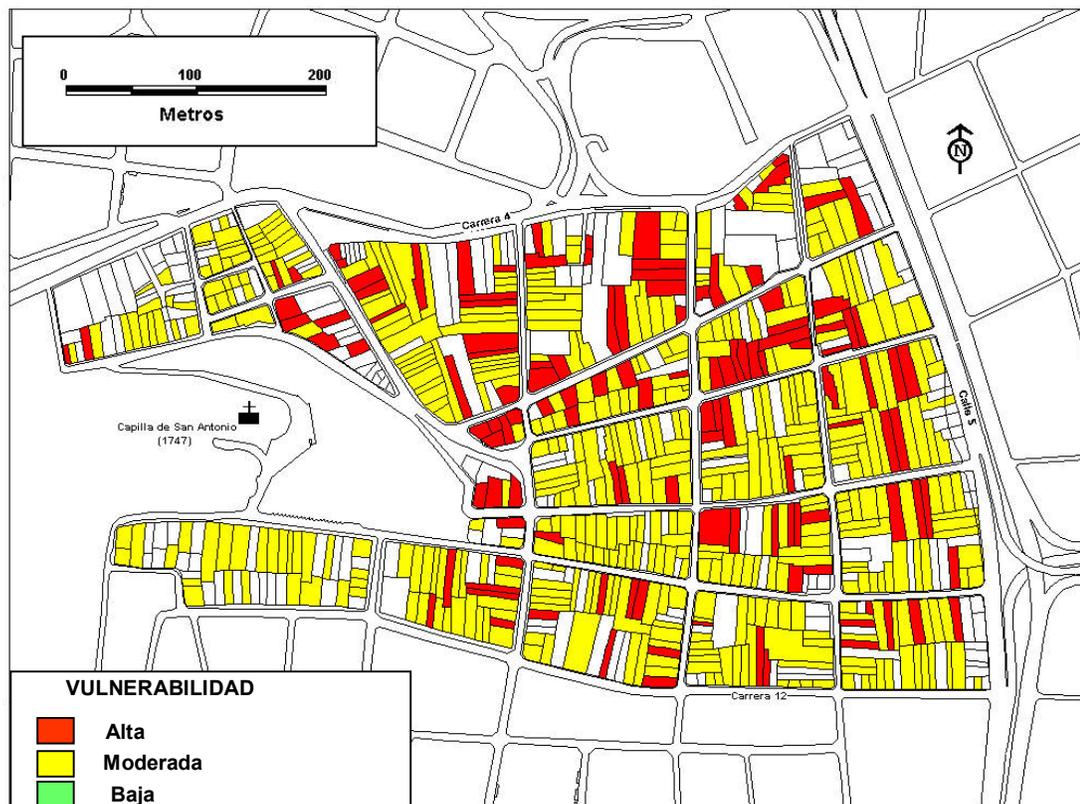


Figura 153. Vulnerabilidad física-global o del conjunto.

8.5.3 ESTIMACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE DAÑO SÍSMICO.

8.5.3.1 Daño Sísmico en las edificaciones.

Las estimaciones que se realizaron para la determinación de los posibles escenarios de daño sísmico de las edificaciones de uno y dos pisos, construidas en mampostería en el barrio San Antonio de la ciudad de Cali, son hipotéticas y deben ser utilizadas para propósitos de mitigación del riesgo sísmico, y la identificación de los elementos en riesgo y priorización de las acciones que contribuyan a la intervención de la vulnerabilidad a partir de estudios con un mayor grado de detalle, también para la toma de conciencia y planificación para la atención de posibles emergencias que puede originar movimiento sísmicos futuros.

El número de edificaciones analizadas fue de 570, que corresponde a más del 70 % de las edificaciones que conforman el tejido urbano del barrio San Antonio.

Para la estimación de los escenarios de daño sísmico, se aplicó la metodología propuesta por *Hurtado (1990) & Cardona (1989)*, en Campos (1992), y que se integra en este trabajo como parte de la metodología propuesta.

Los resultados probables de daño sísmico hipotético en el conjunto de edificaciones estudiadas se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 29. Resumen resultados de daño sísmico

Categoría de daño sísmico	Número de edificaciones afectadas		
	Hipótesis 1 0.07 g	Hipótesis 2 0.17 g	Hipótesis 3 0.25 g
Ninguno	329	25	0
Menores	172	80	27
Moderados	45	129	50
Mayores	21	194	166
Totales	3	98	141
Colapso	0	44	186

Los efectos para categoría de daños son de acuerdo con Hurtado (1990), en Campos (1992) son:

1. **Ninguno:** sin daños.
2. **Menores:** daños menores en elementos arquitectónicos.
3. **Moderados:** daños generalizados en los elementos arquitectónicos y daños menores en los elementos estructurales.
4. **Mayores:** daños generalizados en los elementos estructurales y arquitectónicos.
5. **Totales:** daños en la estructura no reparables, por lo tanto la edificación debe ser demolida y reemplazada.
6. **Colapso:** edificación parcial o totalmente colapsada por inestabilidad.

8.5.3.2 Escenario de daño sísmico para una aceleración $A_a = 0.07 g$.

El mayor porcentaje de afectación en las edificaciones de 1 y 2 pisos del barrio serían daños menores en un 30 %; el 57 % de las edificaciones no presentaría ningún daño, el 4 % de las edificaciones tendrían daños mayores, el 8 % presentarían daños moderados y el 1 % de las edificaciones presentarían daños totales, en ninguna de las construcciones se presentarían colapsos.



Figura 154. Daños hipotéticos con un sismo de 7% de g

8.5.3.3 Escenario de daño sísmico para una aceleración $A_a = 0.17 \text{ g}$.

El mayor porcentaje de daños en las edificaciones de 1 y 2 pisos del barrio estarían representados en daños mayores con un 34 %, seguido por daños moderados con un 23 %, un 17 % por daños totales, un 14 % daños menores, un 8 % colapso y 4 % no sufrirían daños.



Figura 155. Daños hipotéticos con un sismo de 17% de g.

8.5.3.4 Escenario de daño sísmico para una aceleración $A_a = 0.25 \text{ g}$.

El mayor porcentaje de afectación en las edificaciones de 1 y 2 pisos del Barrio San Antonio estaría representado por colapsos en un 32 %, seguido por daños mayores con un 29 %, un 25 % por daños totales, un 9 % de daños moderados, y daños menores en un 5 % de las edificaciones.



Figura 156. Daños hipotéticos con un sismo de 25% de g

Las posibles causas que pueden generar daño sísmico en las edificaciones de mampostería de uno y dos pisos en el barrio San Antonio y que se mencionan a continuación, son el resultado de las investigaciones realizadas por parte del autor de este trabajo, con base en el análisis de las técnicas constructivas tradicionales y contemporáneas, que han marcado el desarrollo urbano de la ciudad en materia de vivienda popular y las enseñanzas aportadas por terremotos anteriores, donde este tipo de viviendas han resultado ser las mas afectadas.

De acuerdo con lo anterior se determinaron las posibles causas de daño sísmico por estilo arquitectónico, debido a que cada uno de ellos obedece a materiales, técnicas y formas constructivas de una época, que es necesario tener en cuenta para identificar los elementos más susceptibles a sufrir o generar daño. En este sentido el autor introduce el **estilo arquitectónico** como un nuevo elemento a tener en cuenta en los estudios de vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes, para ser utilizado en especial en zonas antiguas o centros históricos en donde por sus características urbanas, coexisten una serie de manifestaciones arquitectónicas, que es necesario diferenciar para un mejor entendimiento de comportamiento sísmico de las edificaciones y sus posibles fallas.

Tabla 30. Posibles causas de vulnerabilidad por estilos arquitectónicos.

Tradición Colonial	Republicano	Ecléctico	Moderno popular
<ol style="list-style-type: none"> 1. Falta de mantenimiento. 2. Falta de confinamiento de muros 3. Adiciones de muros en otros materiales. 4. Cubiertas pesada en el caso de la teja de barro. 5. Cimentación deficiente. 6. Mala calidad del adobe y del mortero de pega en muros. 7. Erosión de los muros de adobe, por exposición al medio ambiente y a la humedad. 8. Amarres deficientes entre cubiertas y muros 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Amarres deficientes entre cubiertas y muros. 2. Falta de mantenimiento. 3. Falta de confinamiento de muros 4. Adiciones de muros en otros materiales. 5. Cubiertas pesada en el caso de la teja de barro. 6. Cimentación deficiente 7. Gran peso de la edificación especialmente en viviendas de 2 pisos 8. Mayor porcentaje de aberturas en muros. 9. Irregularidad en planta. 10. Anclaje de elementos decorativos como cornisas y adornos 11. Erosión de los muros de adobe, por exposición al medio ambiente y a la humedad 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Amarres deficientes entre cubiertas y muros. 2. Falta de mantenimiento. 3. Falta de confinamiento de muros 4. Adiciones de muros en otros materiales. 5. Cubiertas pesada en el caso de la teja de barro. 6. Cimentación deficiente. 7. Falta de amarres y estabilidad de áticos, cornisas y adornos. 8. Baja calidad del mortero de pega de la mampostería con argamasa (cal + arena) 9. Gran peso de la edificación, especialmente en viviendas de 2 pisos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Amarres deficientes entre cubiertas y muros. 2. Falta de mantenimiento. 3. Falta de confinamiento de muros 4. Cubierta pesada en el caso de la teja de barro y losas. 5. Cimentación deficiente. 6. Falta de amarres y estabilidad de áticos, antepechos y culatas. 7. Gran peso de la edificación, especialmente en viviendas de 2 pisos 8. Irregularidad en planta 9. Irregularidad en altura 10. Baja calidad del mortero de pega de la mampostería 11. Elementos de fachada sueltos 12. Debilitamiento de muros debido a gran cantidad de aberturas

8.5.3.5 CALCULO DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS

Para el cálculo de las pérdidas económicas probables de daño sísmico en el barrio, para las tres hipótesis planteadas, se supone que el costo de los daños corresponde a un porcentaje de reposición por metro cuadrado. Las pérdidas económicas se calculan, para cada edificación, como el producto del porcentaje de daños totales, por el área construida de la edificación y por el costo de reposición del metro cuadrado.

Debido a la falta de información sobre datos específicos en Colombia, de acuerdo con *Campos* (1992), se pueden utilizar valores promedios obtenidos de evaluación estadísticas de sismos ocurridos en diferentes partes del mundo. Según *Whitman & Cornell* (1976) en *Campos* (1992), los porcentajes de los costos directos para las seis categorías de daño estimados.

Los costos de reposición se evalúan para la ocurrencia de eventos individuales (riesgo específico) y no en forma acumulativa para los daños ocurridos durante el tiempo de exposición se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 31. Área afectada según categoría de daños.

Categoría de daño sísmico	Daños totales
Ninguno	0%
Menores	0.3%
Moderados	5%
Mayores	30%
Totales	100%
Colapso	100%

Fuente: Tomada Según *Whitman & Cornell* (1976) en *Campos* (1992).

Para calcular los costos de reposición de las edificaciones afectadas por los sismos hipotéticos planteados, se tuvieron en cuenta los costos directos por metro cuadrado proyectados para el mes de diciembre de 2001 de acuerdo con los *Índices de Costos de Construcción de Vivienda (ICCV)*, DANE, (2001), calculo que fue realizado a partir de los valores, del CONSTRUDDATA de 1997.

Los costos de reconstrucción por metro cuadrado de vivienda serian entonces de \$336.050, (a este valor se le redujo el costo del lote que se asumió como un 35% de los costos totales de la construcción de una vivienda nueva clasificada en el CONSTRUDDATA (1997) como Unifamiliar Medio/Medio y que tiene un costo por metro cuadrado proyectado a diciembre del año 2001 de \$517.000.

Tabla 32. Cálculo de pérdidas económicas.

Categoría de daño sísmico	Hipótesis 1 Aa = 0.07 g	Hipótesis 2 Aa = 0.17 g	Hipótesis 3 Aa = 0.25 g
Ninguno	-	-	-
Menores	\$42.010.115	\$ 12.920.375	\$4.134.968
Moderados	\$215.023.273	\$358.147.388	\$132.792.258
Mayores	\$788.978.190	\$4.165.902.634	\$2.815.624.329
Totales	\$514.828.600	\$8.522.933.705	\$9.852.817.975
Colapso	-	\$5.284.470.263	\$17.081.455.105
Valor total en pesos	\$ 1.560.840.177	\$ 18.344.374.364	\$ 29.886.824.635
Valor total en dólares	US\$ 709.473	US\$ 8.338.352	US\$ 13.584.920

Es necesario aclarar que los costos obtenidos estan en función del área de la edificación que sería necesaria reponer en caso de que esta sufriera algún tipo de daño.