

RESUMEN

En este trabajo se construyen y evalúan los posibles escenarios de vulnerabilidad y de daño sísmico a gran escala de las edificaciones de mampostería de uno y dos pisos del barrio San Antonio, Cali, Colombia, considerado de interés patrimonial por su valor arquitectónico, histórico y documental. Alrededor del 73 % de sus edificaciones fueron construidas en mampostería no confinada de adobe y ladrillo, tipologías constructivas que han demostrado un alto grado de susceptibilidad frente al fenómeno sísmico.

La metodología para la determinación de la vulnerabilidad sísmica utilizada, es desarrollada por el autor y se enmarca dentro de la categoría de **Vulnerabilidad Observada**. De otro lado con base en el método de Hurtado se determina la categoría de daño sísmico de las edificaciones, a partir del cálculo de la ductilidad, para tres sismos hipotéticos. Con los resultados obtenidos de las evaluaciones anteriores, se construyen posibles **escenarios de vulnerabilidad y de daño sísmico**.

Se pudo establecer que la muestra analizada presenta una vulnerabilidad global, donde el 78 % de las edificaciones, es decir, la mayoría, calificaron con **vulnerabilidad moderada**, y con **vulnerabilidad alta** calificaron el 22 % restante. Además se determinó que para un sismo de **Aa = 0.07 g**, el 57 % de las edificaciones no presentaría daño. Para un sismo de **Aa = 0.17 g**, la mayoría de efectos estarían representados en daños mayores en un 34 %, y para un sismo de **Aa = 0.25 g**, el mayor porcentaje de daños estaría representado por colapsos en un 32 %.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

Las necesidades insatisfechas, la falta de conocimiento o el incumplimiento de normas establecidas dentro de una comunidad, contribuyen a la generación de diversos escenarios, donde tanto las amenazas naturales como las amenazas antrópicas, sumado a unas condiciones de vulnerabilidad social, institucional, cultural, económica, política, física, ambiental, representan una condición de riesgo para la población. Se puede decir que la vulnerabilidad sísmica de las ciudades está asociada a los procesos del desarrollo y es dinámica en el tiempo, factor que la hace intervenible y modificable. (*Wilches, 1989; Jaramillo, 1994*).

Existen poblaciones que son vulnerables desde su origen (*Vulnerabilidad de origen*) debido a una construcción inadecuada en zonas no aptas, así como a la ausencia de mínimas normas constructivas de diseño sísmico, y a la utilización de materiales de baja calidad. Otras sin embargo, siendo emplazadas en zonas seguras desde un principio, se han vuelto vulnerables con el tiempo (*Vulnerabilidad progresiva*), debido al deterioro de las edificaciones (zonas históricas por ejemplo), a la falta de mantenimiento, y al cambio de uso, entre otros (*Maskrey & Romero, 1986*).

Muchas de las ciudades colombianas conservan zonas conformadas por edificaciones que son vestigio de su desarrollo urbano. En estas zonas convergen diversas manifestaciones arquitectónicas y constructivas propias de cada época, las cuales con el transcurrir del tiempo han sido transformadas, mediante intervenciones de tipo constructivo, (reformas, adiciones, mutilaciones, etc.) que muchas veces ocasionan agudos procesos de deterioro.

Los procesos asociados al desarrollo urbano de Cali desde la época de la fundación hasta el presente, han contribuido a la generación de diversos escenarios de vulnerabilidad sísmica en muchos sectores de la ciudad, los cuales son producto de fenómenos sociales, culturales, políticos, ambientales y económicos.

El barrio San Antonio pertenece a la Comuna 3, y se encuentra localizado al Nor-Occidente de la ciudad de Santiago de Cali, sobre el piedemonte de la Cordillera Occidental, a partir de la cota 1000 msnm hasta la cota 1080 msnm, entre las coordenadas geográficas 109850N a la 110350, y 110000E a la 110800E, ocupando un área aproximada de 17 hect., conformadas por 27 manzanas, comprendidas entre la colina de San Antonio y la calle 5^{ta}, y las carreras 4^{ta} y 12.

Su plano cumple características de damero, en forma de tablero de ajedrez, con calles estrechas, herencia de la tradición colonial. En la parte alta del barrio se localiza la Capilla de San Antonio, que evoca la arquitectura colonial de Santiago de Cali, inaugurada al parecer en julio de 1747 (*Quintero & Barandica, 1985*).

Este barrio ha sido un sector tradicionalmente ligado a la historia de la ciudad de Cali, además tiene la particularidad de estar conformado por edificaciones construidas en diferentes épocas, concentradas en una misma área.

La gran mayoría de las viviendas son de adobe, ladrillo cocido y bahareque (en un menor grado ya casi inexistente), cuyas alturas varían de uno a dos pisos. Se encuentran viviendas de tradición colonial, republicana, ecléctica y moderna, según la clasificación existente en el "Plan de recuperación urbanístico y arquitectónico del barrio San Antonio 1998-2000" (SMP, 1998).

Se puede decir que en el barrio convergen la mayoría de las manifestaciones arquitectónicas que han caracterizado el desarrollo urbano de la ciudad en diferentes épocas, y que han desaparecido por completo en algunas zonas del "centro histórico de Cali", a causa del deterioro, o por la implementación de nuevos desarrollos urbanísticos.

El conocimiento de las prácticas constructivas del país, las normas de diseño sismo resistente, el tipo de materiales utilizados, la clasificación de los estilos arquitectónicos y el comportamiento sísmico observado de diversos sistemas estructurales sometidos a movimientos telúricos en el pasado, aportan elementos importantes para el estudio de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones objeto de este trabajo.

La metodología utilizada para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica desarrollada por parte del autor se elaboró a partir del estudio de diversos procedimientos o métodos existentes en el ámbito mundial; la identificación de las principales causas de daño sísmico en edificaciones de uno y dos

pisos en mampostería en terremotos pasados y los principios de la sismo resistencia, y la metodología utilizada para la determinación del daño sísmico fue la desarrollada por Hurtado en 1990. A partir de los resultados obtenidos del cálculo de la vulnerabilidad y el daño se construyeron posibles "*Escenarios de vulnerabilidad* " y "*Escenarios de daño sísmico*" a gran escala.

La estimación de la vulnerabilidad y el daño sísmico probable de las edificaciones existentes es un componente imprescindible de cualquier plan de mitigación, tanto más, si se piensa que los avances del conocimiento en Ingeniería Sísmica, reflejados en los conceptos de diseño sismo resistente, pueden estar incorporados, al parecer, sólo en las construcciones más recientes (*Jiménez et al*, 1999).

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Vulnerabilidad sísmica de edificaciones.

Históricamente el territorio colombiano se ha visto sometido a una serie de movimientos sísmicos que han ocasionado gran cantidad de víctimas y cuantiosas pérdidas materiales, afectando principalmente edificaciones de uno y dos pisos de construcción popular.

Según la Base de Datos de DESINVENTAR de la Red de Estudios Sociales, en Prevención de Desastres en América Latina (La Red), en el siglo XX más de 60 000 viviendas colombianas fueron afectadas por terremotos; por lo menos 50 000 quedaron destruidas, ocasionando más de 3000 heridos e igual número de muertos. Los departamentos más afectados fueron los localizados en la región andina, entre ellos el Valle del Cauca, con más de 1000 viviendas destruidas y con cientos de personas afectadas, generando cuantiosas pérdidas económicas (tomado de la red mundial: *“Base de Datos Desinventar - Colombia”*, en <http://www.desinventar.org>).

Cali se encuentra localizada en una zona de amenaza sísmica alta; la ciudad se desarrolló a lo largo de unos 400 años sobre terrenos poco susceptibles a amenazas geológicas y con características geotécnicas relativamente buenas (Velásquez & Meyer, 1994). Pero, a pesar de esta condición, muchas de las edificaciones asentadas en su territorio, sufrieron daños en terremotos pasados.

Se tiene evidencia histórica de sismos que desde 1566 han afectado en forma considerable las edificaciones de la zona del centro de Cali. Se puede decir, que los efectos generados por movimientos sísmicos importantes con incidencia en edificaciones de uno y dos pisos de construcción tradicional de adobe, tapia y bahareque, se localizaron en inmediaciones del barrio San Antonio, en el centro histórico de la ciudad, y en un periodo comprendido entre 1566 y 1925, debido a que la mayoría de viviendas que conformaban el tejido urbano hasta esa época obedecían a edificaciones de baja altura y construcción tradicional. Es solo a partir de 1925 cuando aparecen las primeras edificaciones que obedecen a técnicas constructivas modernas como el teatro municipal, el edificio Emiliano Otero y el Palacio Nacional y la ciudad comienza a crecer en altura de mas de dos pisos (*Mosquera & Aprile, 1984*).

Los terremotos como *“laboratorios a gran escala”*, han demostrado qué tan susceptibles pueden ser las edificaciones de construcción popular frente al fenómeno sísmico. Sismos como el de Cúcuta en 1981, el de Popayán en 1983 y el del Eje Cafetero en 1999, entre otros, generaron cuantiosas pérdidas económicas y afectaron el PIB (Producto Interno Bruto) de Colombia, ocasionando que la mayor parte de los recursos destinados a la *“inversión social”* se utilizaran en la fase de recuperación y reconstrucción de las poblaciones afectadas, generando un déficit mayor en la economía del país.

Uno de los antecedentes regionales más cercanos de terremotos que han afectado a centros históricos, o a sectores antiguos de construcción tradicional en Colombia, es el de Popayán, el 31 de marzo de 1983. La mayoría de edificaciones del sector más antiguo de esta ciudad, construidas en materiales como tapia y adobe fueron seriamente dañadas. Según el informe de *Ramírez* (1986) para el Banco de la República, el centro histórico de Popayán estaba conformado por 54 manzanas con un total de 1727 edificaciones, de las cuales el 18 % fueron destruidas, por lo menos el 56 % quedaron semidestruidas, y alrededor de un 26 % quedaron averiadas.

Otro antecedente importante sobre efectos sísmicos en edificaciones de construcción tradicional, es el terremoto de Cúcuta el 17 de octubre de 1981, donde la construcción tradicional dominante de la ciudad estaba conformada por viviendas de bahareque y adobe para las casas más antiguas, y otras de ladrillo pegadas con calicanto, que conformaban por lo menos el 80 % del total de las edificaciones de la ciudad en la época del sismo. Según el informe de *Sarria* (1982) de un total de 2301 casas evaluadas al mes de Noviembre de 1981, alrededor de un 30 % resultaron destruidas, otro 40 % quedaron semidestruidas y cerca del 30 % sufrieron averías.

Según *Aprile & Mosquera* (1984) “...Las tipologías habitacionales son dinámicas, se hallan en continua transformación y expresan el pasado, el presente, y el porvenir de la sociedad o comunidad que albergan...”, en este sentido, se puede decir que la probabilidad de desastres futuros en los “Centros históricos “ ó sectores antiguos de las ciudades, se hace cada vez más evidente en la medida que estos, se transformen sin ningún control.

1.2.2 Antecedentes de estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico en otros países.

A escala mundial se han desarrollado estudios conducentes a la determinación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de centros urbanos, tal es el caso de las investigaciones y proyectos realizados en España, Italia, Japón, EEUU, Ecuador, Perú, México, Chile, Argentina, Colombia, etc. Dado el impacto negativo que producen los terremotos en la economía y en el desarrollo de un país.

Los europeos, por ejemplo, han desarrollado diversas metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones y la determinación del riesgo sísmico, mediante procedimientos como el *“Método del Índice de Vulnerabilidad”* (Petrini & Benedetti, 1984 en Jiménez et., al. 2000), que ha sido ampliamente utilizado en Italia durante los últimos años, por el GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti) y adoptado como herramienta para los planes de mitigación de desastres en el ámbito gubernamental (Caicedo, et., al. 1994).

El método del Índice de vulnerabilidad también ha sido empleado en el Proyecto SERGISAI (Seismic Risk Evaluation Trough Integrated Use of Geographical Information Systems and Artificial Intelligence Techniques) 1996-1998: Proyecto del IV Programa Marco de Investigación y Desarrollo de la Unión Europea - UE, donde se ha desarrollado un prototipo informático de determinación del riesgo sísmico a escala regional, sub-regional, y local. (tomado de la red mundial: *“Proyecto SERGISAI”* Menoni et., al. 1997, en [www.ade.irrs.mi.cnr.it/ SERGISAI/Docs /PAPAERS/ Brux](http://www.ade.irrs.mi.cnr.it/SERGISAI/Docs/PAPAERS/Brux)

_97.html).

También se desarrolló el proyecto RELMER (Reduction of Earthquake Losses in the Mediterranean Region), el cual fue patrocinado por la UNESCO y el U.S Geological Survey (USGS) en 1998 (*tomado de la red mundial: Seismic Risk Projects, CSIC en <http://www.dgija.csic.es/seismic.html>*).

De los trabajos realizados en Latinoamérica, se puede mencionar el estudio de amenaza sísmica en el Austro, “Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en la Ciudad de Cuenca Ecuador” (RSA – Red Sísmica del Austro) 1998-2001, en el que se utilizó la metodología del “índice del vulnerabilidad” para evaluar las edificaciones en MNR (mampostería no reforzada) y HA (Hormigón armado o concreto reforzado) Según *Jiménez et al* (2000).

En la región central de Chile se desarrolló el “Estudio de Vulnerabilidad Sísmica de Viviendas de Adobe en la Zona de Coelemu” (8ª Región, Chile), donde se utilizó la metodología propuesta por el Istituto di Scienza e Técnica delle Costruzioni (I.S.T.C) (Giuliano et al, 2000) y finalmente, en Gran Mendoza, Argentina, *Fernández* (2000) trabajó con la propuesta de “Modelo Experimental para la Evaluación de la Vulnerabilidad de Sistemas Urbanos en Zonas Sísmicas”.

Se puede decir que en el ámbito mundial se han generado numerosos proyectos e investigaciones, en lo concerniente a estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico, los cuales abarcan diversas escalas con características particulares. Estos estudios se han desarrollado de acuerdo al grado de

detalle requerido y a los recursos disponibles, pero con el objetivo primordial de ser utilizados como herramientas para la planificación y la gestión del riesgo.

1.2.3 Antecedentes de estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico en Colombia.

1.2.3.1 Cali.

En 1988 se iniciaron las evaluaciones de la vulnerabilidad sísmica urbana de Cali al igual que evaluaciones para las instalaciones claves y líneas vitales (Ramírez et al, 1992, en Campos, 1992).

En la ciudad el antecedente más cercano del presente trabajo, lo constituye el informe final de la "*Mitigación del Riesgo Sísmico en Cali*" auspiciado por el Programa para la Mitigación de Riesgos en Colombia y la UNDRO, la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional, y la Oficina Nacional para la Prevención de Desastres, (Campos, 1992), estudio realizado como parte del *Proyecto Integral para la Mitigación del Riesgo Sísmico de Cali* (Meyer, 1990), elaborado por el Observatorio Sismológico del Sur Occidente OSSO, el cual contempló actividades relacionadas con la evaluación de las amenazas ó peligros naturales, la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de los elementos expuestos y el diseño de medidas para la mitigación y reducción del riesgo sísmico.

La evaluación de la vulnerabilidad y la estimación del escenario de pérdidas materiales y de vidas en la ciudad, centró su primera fase en el estudio de las edificaciones de uno y dos pisos construidas en mampostería, debido a que este tipo representaba más del 80 % de las edificaciones de Cali. Además, la experiencia de terremotos pasados demostró que el mayor número de pérdidas de vidas y daños materiales se concentraba en este tipo de viviendas (Grases, 1985, en Meyer, 1990).

La metodología utilizada para realizar dicho estudio se basó en métodos "teóricos" (Cardona, 1989; Hurtado, 1990, en Meyer, 1990). Los resultados obtenidos se dan en términos de pérdidas materiales y de vidas, considerando la posible ocurrencia de dos sismos, con aceleraciones pico efectiva (A_a) de 0.25 g y 0.17 g respectivamente, estos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de resultados de pérdidas de vidas y materiales

Pérdida de Vidas y Materiales	Hip.1 $A_a = 0.17 \text{ g}$	Hip. 2 $A_a = 0.25 \text{ g}$
Número probable de muertes	7600	16 000
Número probable de heridos	34 500	78 400
Relación heridos/muertes	4.5	4.9
Muertes por cada 10 000 habitantes	540 000	960 000
Pérdidas. mat. en millones de pesos	\$540 000	\$960 000
Pérdidas. mat. en millones de dólares	US\$850	US\$1500

Fuente: Campos (1992)

El estudio considera que inevitablemente existen incertidumbres en los escenarios sísmicos teóricos, particularmente asociadas con las relaciones de movimiento/daños. Concluye entonces, que aunque la precisión de las pérdidas estimadas no es muy grande, sirve para tener un valor aproximado de las pérdidas materiales, de vidas y del número posible de heridos, con el objetivo de definir donde se deben concentrar esfuerzos para la reducción del riesgo y la respuesta operativa en caso de una emergencia.

Si se comparan las poblaciones e indicadores económicos de cada capital del Occidente Colombiano con respecto a Quibdo, en términos del índice de riesgo, en caso de que ocurriera un terremoto con las mismas características del que afectó a la ciudad de Armenia, según *Velásquez, et.,al.* (2001) se obtendrían las siguientes cifras.

Tabla 2. Comparación de índices relativos de riesgos

Ciudad	Riesgo /Población	Riesgo/ Economía
Quibdo	1	1
Armenia	1.6	20
Cali	18	1069

Fuente: Tomado *Velásquez*, 2001.

De acuerdo con *Velásquez* (2001), las pérdidas generadas por el sismo del 25 de enero de 1999, según el informe del CEPAL: “Informe de Pérdidas por el Terremoto del Eje Cafetero”, publicado en el Espectador, en mayo de 1999, fueron de \$2.8 billones de pesos, que es un valor mayor al 2.2 % del

PIB colombiano en 1998. La extrapolación lineal de pérdidas realizada por el autor, para la ciudad de Cali, el número posible de muertos y heridos sería de más de 18 veces y las pérdidas económicas serían mayores de 50 veces. Es decir, que en términos del PIB se estaría hablando de un porcentaje de pérdidas potenciales mayor a 129 % del PIB/año de Colombia.

1.2.3.2 Popayán.

Teniendo en cuenta los daños observados generados por el terremoto del 31 de marzo de 1983 y las experiencias en la reconstrucción de numerosas edificaciones, se propuso y aplicó una metodología sencilla para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de Popayán (*INGEOMINAS*, 1992).

Para fines del estudio las edificaciones se clasificaron en tres tipos: arquitectura clásica de los siglos XVIII y XIX, ladrillo cocido y edificios con estructuras aporticadas. Los templos religiosos se analizaron de manera individual debido a su complejidad estructural.

De acuerdo con *INGEOMINAS* (1992) el procedimiento para el cálculo de la vulnerabilidad sísmica se realizó a partir de la calificación de un índice de vulnerabilidad “V”, que determina si la edificación es segura, dudosa (lo que significa estudio mas detallado) o riesgosa (es decir, requiere intervención). En este estudio se determinó el riesgo sísmico relativo, en función del factor de importancia “I”, y la estimación del nivel de eventualidad sísmica “H”.

Según los resultados obtenidos en la evaluación de vulnerabilidad sísmica global de las edificaciones de Popayán (figura 8.2, Distribución global de la vulnerabilidad) p.202 en *INGEOMINAS* (1992) más del 95 % son construcciones seguras, por lo menos un 4 % son construcciones de categoría dudosa, es decir, que ameritan estudios más detallados y alrededor de un 1 % son construcciones riesgosas, es decir, requieren intervención.

Las edificaciones con mayor grado de vulnerabilidad (figura 8.4 Vulnerabilidad promedia p.203 en *INGEOMINAS*, 1992), son los templos religiosos, seguidas por las edificaciones de arquitectura clásica española de los siglos XVIII y XIX. Las edificaciones de ladrillo, prefabricadas y de hormigón armado presentan un menor grado de vulnerabilidad.

1.2.3.3 Medellín.

En Medellín se desarrolló el proyecto "Estudio de la Amenaza, Zonificación, Análisis y Vulnerabilidad Sísmica para Medellín, 1994" (*Velásquez et al*, 1994), el cual se restringe a la infraestructura residencial, comercial e industrial. Se empleó como metodología un tratamiento estadístico en términos de variables generales tales como la densidad de construcción, estrato socioeconómico, número de pisos, tipo de cubierta, edad de la construcción y su uso. La vulnerabilidad se describió en términos de aceleración basal resistente elástica, periodo fundamental de vibración de la estructura y la función de daños.

Los resultados obtenidos fueron la determinación de escenarios de pérdidas materiales y de vidas, mapas de periodos de vibración y amplificaciones del

suelo y mapas de periodos y amplificaciones del espectro de respuesta para diferentes eventos.

1.2.3.4 Bogotá.

El estudio de "Estimación del riesgo sísmico relativo de Santa Fé de Bogotá, Colombia" (*Cardona*, 1999), abarcó las localidades que conforman el centro urbano metropolitano de la ciudad (Alcaldías menores), e incluyó aspectos sociales y económicos, adicionales a las variables sismológicas y de ingeniería, obtenidas en el estudio detallado de microzonificación sísmica.

La metodología utilizada estimó "el índice de riesgo físico" y el "índice de riesgo en el contexto", para la determinación del riesgo sísmico relativo. Las variables utilizadas para la determinación del índice de riesgo físico se componen del área destruida por sismo, número de fallecidos, roturas en la red de acueducto y de gas, longitud de la caída de redes eléctricas y número de centrales telefónicas afectadas. El índice de riesgo del contexto se compone de indicadores de la vulnerabilidad sísmica del contexto, exposición, fragilidad social y falta de resiliencia (*Cardona*, 1999).

Los resultados obtenidos fueron la categorización de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de las diferentes alcaldías menores de Bogotá, mediante la integración del "índice de riesgo físico" y el "índice de riesgo del contexto".

1.2.3.5 Pereira.

En Pereira se llevó a cabo el proyecto "Vulnerabilidad sísmica urbana de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal" (*Campos & Jaramillo*, 1999). La muestra abarcó edificaciones residenciales, comerciales, industriales, institucionales y educativas. La metodología utilizada tuvo en cuenta la caracterización de la amenaza sísmica y los suelos, además del inventario de edificaciones, de los diferentes tipos de estructuras objeto del estudio, parámetros que sirven para definir un modelo de pérdidas económicas y de vidas.

Las variables para la determinación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones fueron el número de niveles, el tipo de estructura, el uso, el tipo de cubierta, edad, estrato, densidad de la construcción, geometría de los sectores y el tipo de suelo predominante por manzana. Los resultados obtenidos se expresaron en función de la generación de escenarios futuros de riesgo, en términos de pérdidas económicas y de vidas, bajo tres hipótesis de sismos probables planteados en el estudio.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 Pertinencia del estudio.

La determinación de escenarios de vulnerabilidad sísmica y de daños en el barrio San Antonio es pertinente, en tanto se enfoca como un estudio de vulnerabilidad sísmica a gran escala, aplicado a un sector urbano con unas condiciones particulares y representativas desde el punto de vista tecno/constructivo y arquitectónico. Si bien, pueden existir limitaciones para la generación de escenarios de daños debido a su carácter de índole académico, preliminar y cualitativo, este estudio constituye una primera aproximación al conocimiento de las condiciones de vulnerabilidad y riesgo sísmico de un sector específico.

El barrio está asentado sobre una zona de características geotécnicas relativamente buenas, no obstante, la mayoría de sus construcciones principalmente de uno y dos pisos, alrededor de un 70 %, fueron construidas antes de la expedición de la primera norma de construcción sismo resistente CCCSR-84.

La mayoría de los componentes o elementos de los centros urbanos amenazados por futuros eventos sísmicos, obedecen a técnicas constructivas espontáneas o tradicionales, o a obras de ingeniería que no cumplen con los mínimos requerimientos. De acuerdo con esto, el riesgo sísmico, o la probabilidad de daños o pérdidas sobre los elementos existentes, puede llegar a ser muy alto, debido a que un significativo

porcentaje de los componentes físicos de los escenarios urbanos amenazados ofrecen un alto grado de vulnerabilidad (*Cardona*, 1990).

Según la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (en *CISMID*, 1986), muchas de las pérdidas de vidas en los terremotos pasados han ocurrido debido al colapso de las edificaciones construidas con materiales tradicionales como piedra, ladrillo, adobe y madera, las cuales no fueron particularmente diseñadas para ser resistentes a los sismos.

Lo anterior significa que en la actualidad numerosas edificaciones en la ciudad de Cali en diversos sectores, podrían, de alguna forma, verse afectadas por la acción sísmica, debido a que corresponden a tipologías constructivas de tradición popular, localizadas en los sectores más antiguos de la ciudad (barrio La Merced, San Pedro, San Antonio, El Peñón, entre otros), zonas de deterioro urbanístico (como El Calvario, Sucre, San Nicolás, Obrero) y zonas donde la construcción se caracteriza por su desarrollo progresivo, como en el caso del Distrito de Aguablanca.

1.3.2 Vulnerabilidad de las edificaciones de construcción tradicional.

Muchos de los daños sísmicos por terremotos pasados con efectos en la ciudad se concentraron en un principio en el centro de Cali (La Merced, San Francisco, El Calvario, San Nicolás, Santa Rosa, San Cayetano y San Antonio, entre otros), viéndose afectadas en diversas ocasiones las construcciones de adobe, tapia y bahareque que conformaron el tejido urbano entre 1556 y 1925.

Algunas de las edificaciones que conforman estos barrios permanecen como vestigios de la historia de la evolución de la construcción de vivienda en Cali, a pesar del deterioro, demoliciones o intervenciones desacertadas a que han sido sometidas.

1.3.3 Representatividad del barrio.

Las diversas manifestaciones arquitectónicas presentes en el barrio San Antonio son expresión del desarrollo urbano de la ciudad en materia de vivienda, lo que permite estudiar las diferentes técnicas constructivas y materiales empleados, representativos de cada estilo, concentrados en una sola área. Por lo tanto es posible identificar las causas de daño sísmico asociadas a cada tipología y estilo arquitectónico, las cuales han sido identificadas en viviendas en Colombia con las mismas características después de ser sometidas a sismos, que en muchos casos han resultado con graves daños, o han colapsado.

Los efectos generados por sismos anteriores sobre estas edificaciones, por lo general construidas con técnicas y materiales de construcción tradicional (mampostería sin reforzar o sin confinar), han demostrado lo susceptibles que pueden ser y el riesgo que representan para la población. Además, éstas han evidenciado un comportamiento sísmico y un tipo de fallas similares, generadas al parecer por causas semejantes en cada terremoto. Esto hace pensar en la posibilidad que este tipo de fallas se vuelvan a repetir en construcciones con las mismas características arquitectónicas y constructivas

en las viviendas que hoy en día hacen parte del barrio objeto del presente trabajo.

Por lo tanto, se hace necesario estudiar las causas que generan daño sísmico en estas edificaciones con el fin de construir posibles "*Escenarios de Vulnerabilidad Sísmica*" y "*Escenarios de daño Sísmico*", que contribuyan a identificar las zonas o áreas más vulnerables, con el objeto de plantear estudios mas detallados, que conduzcan a la mitigación de la vulnerabilidad.

1.3.4 Aspecto patrimonial.

Otro aspecto fundamental para la escogencia del barrio como zona de estudio del presente trabajo, es la importancia que tiene como zona de interés patrimonial, ya que es el único conjunto urbano de Cali, que conserva gran número de viviendas republicanas y eclécticas, al igual que algunos ejemplos de construcciones de tradición colonial.

El barrio y la Capilla de San Antonio, están ligados fuertemente a la memoria urbana de Cali, es decir, son espacios urbanos significativos, vestigios del desarrollo urbano de una ciudad en la que se ha arrasado con la mayor parte del patrimonio arquitectónico (*Quintero & Barandica*, 1989; *SMP*, 1998).

San Antonio conserva las características, que Waisman (1993) describe para los centros históricos, éstas son: "*...Un conjunto importante... dentro de un tejido urbano coherente y significativo. Las edificaciones de especial valor, integrados dentro de esa trama homogénea que se ha consolidado a lo largo*

de varios siglos, conforman una unidad urbana en la que se conjugan valores históricos, arquitectónicos, de paisaje urbano, de memoria social..."

1.3.5 Herramienta para la planificación.

Los resultados que arroje el presente trabajo pueden ser empleados como una herramienta para el desarrollo de estudios mas específicos, que permitan conocer de una manera mas detallada las condiciones de vulnerabilidad de las edificaciones, con el fin de direccionar políticas de planificación conducentes a la mitigación de la vulnerabilidad del conjunto urbano.

1.3.6 Herramienta metodológica para diagnosticar la vulnerabilidad sísmica.

El presente trabajo propone un modelo de estudio cualitativo de las vulnerabilidad y riesgo sísmico a gran escala para ser implementado a un nivel más local, con un universo de estudio más específico y una cobertura focalizada que puede ser comunal, barrial o sectorial. La metodología es conveniente, en tanto, puede ser desarrollada en otros barrios de la ciudad, de manera que se empiecen a generar insumos con un menor grado de incertidumbre para el estudio de la vulnerabilidad teniendo en cuenta las características particulares de cada sector de la ciudad.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general.

Construir y evaluar posibles **escenarios de vulnerabilidad y de daño sísmico** de las edificaciones de uno y dos pisos, construidas en mampostería en el barrio San Antonio, teniendo en cuenta las características constructivas, arquitectónicas, estructurales.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Desarrollar una propuesta metodológica para determinar la vulnerabilidad sísmica del barrio San Antonio.
- Identificar de manera general las posibles causas de daño sísmico en las edificaciones objeto de estudio.
- Estimar diversos escenarios de daño y de vulnerabilidad en el barrio San Antonio.
- Generar recomendaciones que permitan desarrollar estudios mas detallados para complementar el estudio.

1.5 ALCANCES

- Inventario de 570 viviendas del barrio San Antonio, 73 % de un piso y 27 % de dos pisos.
- Clasificación de las tipologías constructivas presentes en el barrio, identificando en cada uno de ellos los elementos que los hacen vulnerables.
- Determinación de indicadores de vulnerabilidad, para cada uno de las edificaciones que conforman el barrio, a partir de una evaluación cualitativa, con el fin de construir posibles "Escenarios de vulnerabilidad y escenarios daño sísmico".

1.6 LIMITACIONES

- El estudio se restringe a edificaciones de uno y dos pisos.
- El carácter preliminar del presente trabajo, involucra incertidumbres que pueden irse reduciendo en la medida que se realicen estudios más específicos.
- Los resultados de categorías de daños son aproximaciones a posibles indicadores y no constituyen una predicción exacta debido al carácter preliminar de las estimaciones.
- No se consideran edificaciones de uso especial.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES

La probabilidad de ocurrencia de grandes desastres con consecuencias graves en las poblaciones colombianas crece día a día, por la aparición ó consolidación de escenarios de riesgo a diversas escalas (local, regional, o nacional), como consecuencia de la falta de planificación, el deterioro urbanístico, el crecimiento poblacional, el déficit habitacional, la construcción inadecuada de viviendas y/o asentamientos, además por las políticas económicas y sociales incipientes, que han transformado las estructuras sociales, económicas, físicas, culturales y medioambientales del país, haciéndolas susceptibles a sufrir daño o pérdida, frente a los peligros o amenazas naturales y/o antrópicas. (*Maskrey & Romero, 1986; Wilches, 1989*).

La vulnerabilidad de cualquier elemento estructural, físico o socioeconómico expuesto a un peligro natural es la probabilidad de resultar destruido, dañado o perdido. Esta no debe ser entendida como un proceso estático, sino que debe considerarse como un proceso dinámico, que integra el cambio y el desarrollo, alterando y afectando a todos los elementos expuestos (*Maskrey & Romero, 1986*).

Se puede decir que la amenaza debida a fenómenos naturales, por lo menos actualmente, solo puede ser observada, descrita y cuantificada, a diferencia de la vulnerabilidad que se construye día a día al interior de la sociedad, lo que la hace intervenible y modificable (*Jaramillo & Ortega, 1992*), a través de la toma de medidas estructurales, como la intervención de la vulnerabilidad de las edificaciones y medidas no estructurales con la regulación de los usos del suelo y el debido control por parte de los organismos competentes del cumplimiento de las normas de construcción sismo resistente (*Vargas & Tapia, 2001*).

En este capítulo se definen de una manera global los conceptos sobre riesgo, amenaza y vulnerabilidad, elementos teóricos fundamentales que se emplearán a lo largo del trabajo, haciendo especial énfasis en el tema de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, con base en tres ejes fundamentales: conceptos, hipótesis y teoría.

2.2 CONCEPTOS GENERALES

Las definiciones que se plantean a continuación, son las propuestas por la UNDRO (Organización de las Naciones Unidas encargado de la atención de desastres) en el año de 1979 en el reporte "*Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad*", conceptos que son ampliamente aceptados a escala mundial (*Cardona, 1989*) y que han sido tomados para el desarrollo del presente estudio.

1. Amenaza ó Peligro (**Hazard-H**): es la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un fenómeno natural potencialmente dañino con una cierta intensidad, en un periodo de tiempo y en un sitio determinado.
2. Vulnerabilidad (**Vulnerability-V**): grado de pérdida de un elemento o un grupo de ellos, resultante de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada, expresada en una escala desde 0 (sin daño) hasta 1 (colapso total) o en cualquier escala proporcional a esta.
3. Riesgo Específico (**Specific Risk-Rs**): es la probabilidad esperada de pérdidas debidas a la ocurrencia de un fenómeno natural, expresado como una función de la amenaza ó peligro y la vulnerabilidad.

$$Rs = (H \times V)$$

4. Elementos en Riesgo (**Risk Elements-E**): Definidos como la población, las edificaciones, las obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades, la infraestructura, entre otros, susceptibles a ser afectados por un fenómeno natural.
5. Riesgo Total (**Total Risk-Rt**): es el grado de pérdidas debidas a un fenómeno natural, como una función del riesgo específico y el valor de los elementos en riesgo.

$$Rt = (E) \times (Rs) = (E) \times (H \times V)$$

2.3 AMENAZA SÍSMICA

Colombia está localizada en una de las zonas de mayor actividad sísmica del planeta, denominado “Cinturón circumpacífico”, que corresponde a los bordes del Océano Pacífico, en su territorio convergen tres placas tectónicas, Nazca, Suramericana y Caribe, como se muestra en la figura 1 (Tomado de la NSR-98, 1998).

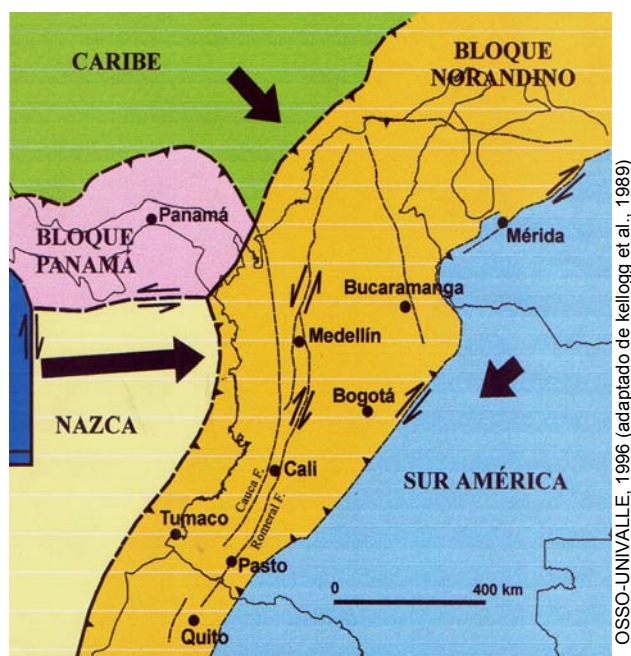


Figura 1. Marco tectónico regional

El país está atravesado por fallamientos que tienen dirección predominante norte-sur, coincidiendo con las cordilleras Central, Occidental y Oriental. Su principal accidente sismo tectónico es la zona de sub-ducción en el Océano Pacífico (NSR, 1998).

En el contexto de la ciudad de Cali, según *Velásquez & Meyer* (1994), el rasgo tectónico más importante de la localidad lo constituye el “Sistema de fallas Cauca”, una de cuyas trazas denominada “Falla Cali” se ubica paralela al piedemonte oriental de la Cordillera Occidental, y desde el punto de vista de su relevancia para la amenaza sísmica sobre la ciudad, su grado de actividad conocido es bajo (*Woodward-clyde*, 1983; OSSO, 1987-1992 , en *Velásquez & Meyer*, 1994).

Las fuentes sismogénicas son:

- La zona de sub-ducción, frente a la Costa del Pacífico, con eventos superficiales con magnitudes superiores a 8,6.
- La zona de Wadatti Benioff , la zona de interacción entre la placa de Nazca, subducida y la corteza continental, con eventos de magnitudes mayores a 6.
- Los sistemas de fallas Romeral, Cauca y otros (el primero fuente generador de los Sismos de Popayán en 1983 y el del Eje Cafetero el 25 de enero de 1999).
- En el Occidente Colombiano se libera aproximadamente más del 80 % de la energía Sísmica del país, la cual la convierte una zonas de mayor complejidad y actividad tectónica *Velásquez & Meyer*, 1994).

En la figura 2 se ilustran los tres tipos de fuentes sismogénicas relevantes en el SW de Colombia. **El número 1** corresponde a la zona de subducción, en el límite de convergencia entre las placas de Nazca y Sur América. Los eventos ocurren hasta profundidades de unos 40 Km, aunque en la figura se representan a mayor profundidad. **El número 2** delimita, aproximadamente, la zona Wadati-Benioff, con profundidades desde 60 hasta más de 120 Km. **El número 3** es un ejemplo de sismicidad superficial, cortical; corresponde a la zona de replicas del terremoto del 6 de junio de 1994, en la región de Tierradentro en Paéz.

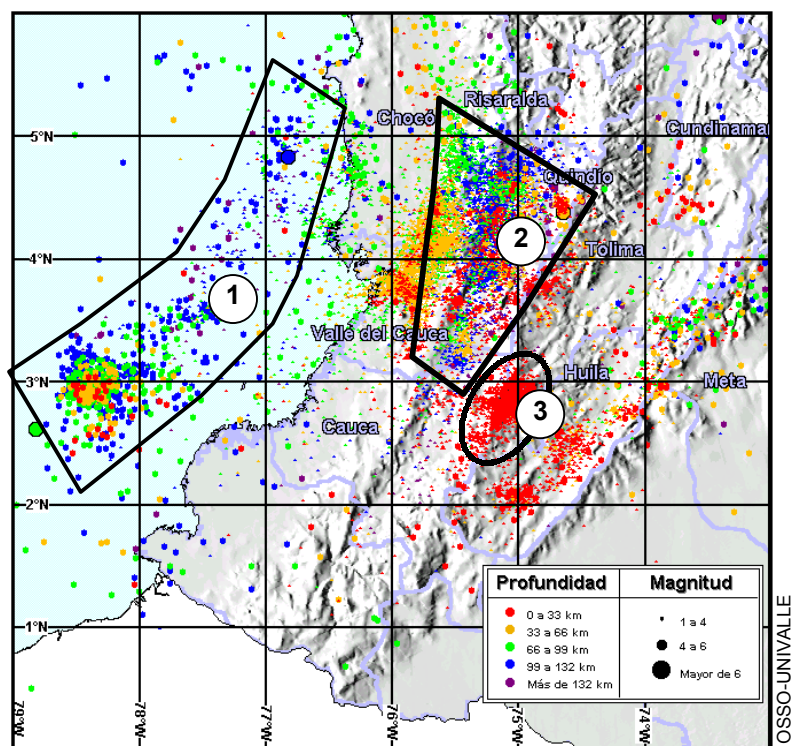


Figura 2. Mapa de sismicidad regional.

2.3.1 Sismicidad histórica.

El primer terremoto del catálogo colombiano que afectó a Popayán y a Cali ocurrió en 1556. La ciudad ha sido afectada por terremotos a más de 400 km entre los cuales se destacan los del 31 de enero de 1906 y 12 de diciembre de 1979, con epicentro frente al Litoral Pacífico colombiano – ecuatoriano.

Los últimos sismos fuertes con algunos daños en Cali ocurrieron el 19 de noviembre de 1991 y el 18 de octubre de 1992, el 6 de junio de 1994 (Páez) y el del 8 de febrero de 1995 (Calima-Darién).

La Red Sismológica del Sur Occidente ha registra en promedio un sismo mensual sentido en la región. Se puede decir entonces, que en el contexto de una ciudad localizada sobre diversidad de suelos y con tipologías constructivas antiguas y modernas se presentan diversos escenarios de riesgo sísmico

Los efectos generados por sismos en las edificaciones de la ciudad de Cali se han concentrado principalmente en dos zonas de la ciudad y durante dos periodos de su acontecer histórico. El primer periodo se puede establecer entre 1556 -1925, cuando la ciudad era todavía un pequeño poblado de no más de 50.000 habitantes, conformado en su gran mayoría por edificaciones de adobe, bahareque y ladrillo, con cubiertas de barro, de las cuales aún quedan algunos vestigios y que hoy conforman el centro histórico de Cali.

Se puede decir, de acuerdo con los archivos y recopilaciones históricas y documentales, que la mayoría de daños por terremotos, hasta 1925 se localizaron en la zona que hoy conforma el centro de la ciudad, afectando por lo general a las edificaciones de construcción tradicional de uno y dos pisos, además, de los templos religiosos que muchas veces sucumbieron al fenómeno sísmico.

El segundo periodo se puede establecer a partir de 1925 hasta el presente, en la "Cali moderna", donde la zona con mayor afectación ha sido la zona del área de influencia del Río Cañaveralejo, y que de acuerdo con *Rosales* (2001), los daños más graves ocasionados por terremotos en los últimos años se han concentrado en esta zona, afectando edificaciones de mayor altura, debido a la amplificación sísmica de los depósitos de suelo.

2.3.2 Catálogo macrosísmico.

La recopilación de este catálogo macrosísmico contiene datos sobre sismos reportados como sentidos en Cali desde 1566 hasta el presente. Según *Rosales* (2001), la documentación de estos sismos proviene principalmente de dos catálogos: el construido por HJ. Meyer -MEY- para Woodwad-Clyde (1983) (y de éste para la CVC, en el Proyecto Calima III y en el Estudio del Riesgo Sísmico para Cali, 1989), y el construido por el Padre *Ramírez* (1975) y compilado en su libro: "Los terremotos en Colombia". Este catálogo fue complementado y compilado por *Rosales* (2001), con información del Archivo macrosísmico del OSSO, información del CERESIS, de NEIC y toda la información generada y copiada por la Red del Observatorio Sismológico

del SurOccidente (1987-2001).

De acuerdo con *Rosales* (2001), entre 1566 y 1989, la información mostrada en los catálogos, se encuentra en los archivos históricos de los cabildos de Cali Popayán, principalmente, así como en fuentes hemerográficas y relatos de los viajeros extranjeros sobre América. Para el S. XIX la información es de dos tipos, siguen siendo importantes los documentos históricos mencionados antes, pero es con la operación de redes de observación sísmológica en el mundo y Colombia que se empieza a disponer de información más técnica. Específicamente los sismos sentidos en Cali provienen principalmente de información de MEY, RAM y CERESIS (intensidades).

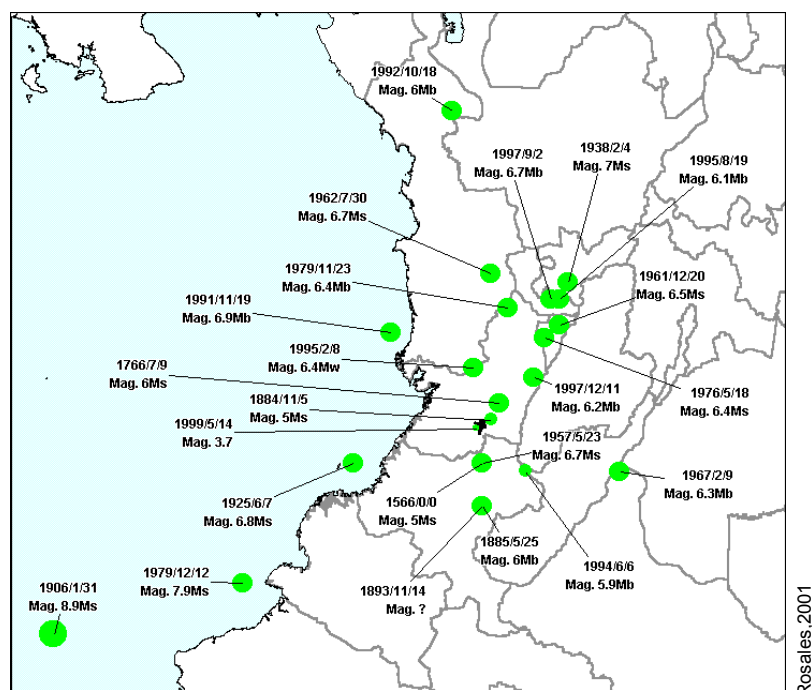


Figura 3. Sismos con efectos en Cali.

Para efectos de este trabajo, se reseñan los terremotos ocurridos entre 1556 a 1925, compilados por *Rosales* (2001), en el "Catalogo de Sismos Con Efectos en Cali 1556-2000", con efectos en las edificaciones localizadas en el centro de la ciudad (zona de influencia del área en estudio), cuando Cali todavía era un pequeño poblado.

Año de 1556.

"...ocurrió un terremoto, el mismo año 66, que arruino, especialmente en Popayan, los edificios de tapias y tejas que se empezaban a construir, pero dejo en pie los de bahareque o embarrado, que llamaban, y paja, como era casi su totalidad el caserio de Cali..." (descrito por Pedro Cieza de León en Arboleda, 1956)

"... Los pocos edificios que empezaban a construirse de tapia y teja, vinieron a tierra tanto en Cali como en Popayán y gracias a ser el resto cubiertos de paja, no quedo totalmente arruinada la ciudad..." (en Ramírez , 1975) según Arroyo 1907).

"...El primero de que hay noticia fue el de 1566, que destruyo las pocas edificaciones de tapia y teja que existían, quedando en pie solamente las de paja..." (en Ramírez (1975) según Aragón, 1941).

4 de Mayo de 1688.

“...Se sintió un movimiento terráqueo bastante fuerte que causo daños en la ciudad de Cali, consistentes principalmente en el cuarteó de edificios...”(OSSO para UNDRO/ACD/ONAD, 1989 con base en Ramírez, 1975)

9 de Julio de 1766.

En Julio 1766 ocurrió un terremoto que afectó varios templos de la ciudad y varias casas.

“...Las casas bajas , han quedado con poca diferencia del mismo modo arruinadas, aunque en las del barrio San Francisco unas padecieron mucho, y otras nada, y aún no escapándose las de paja, cayeron 4 en diversos barrios...”

(del Padre Francisco Xavier Azzoni en Ramírez, 1975).

“...El nueve del corriente julio acometió en esta ciudad como a las cuatro de la tarde un formidable terremoto y tan fuerte que desde los primeros remezones descompuso templos, casas altas y bajas del centro de la ciudad, en tal forma que no son capaces de habitación...”(Tomado de Velásquez & Meyer 1992, según actas del cabildo de Cali (Arboleda, 1956), en Rosales (2001).

“...Un formidable terremoto hizo estragos en la ciudad de Santiago de Cali, se desplomaron templos y casas...” (Silva, 1957), en Rosales (2001).

5 de noviembre de 1884.

"...Terremoto de anoche, miércoles a las 7:45 de la noche, sintióse un terremoto en esta ciudad muy fuerte, el mas fuerte que de 50 años a esta parte se haya sentido. Duró al parecer de 15 a 20 segundos y ha causado daños en lagunas casas y muy graves en la iglesia de San Pedro dejándola en situación de no poder servir para la celebración de los oficios religiosos...(El Ferrocarril, Cali 7 de noviembre de 1884), en Rosales (2001).

"...Temblor sentido en Cali..." (Milne, Jhon. "A Catalogue of Destructive Earthquakes", london, 1906), en Ramírez (1975).

25 de mayo de 1885.

"... En Cali se destruyo el templo de San Pedro, que fue reconstruido. En Popayán el movimiento Sísmico fue tan violento como en Cali" (del Diario del Pacífico, 1937), en Rosales (2001).

31 de enero de 1906.

"...sobre este evento cuyo proceso focal se inicio a centenares de kilómetros, frente a las costas de Ecuador y Colombia, varios reportes (archivos de prensa ;Sebastián, 1965; Rudolph & stzirtes, 19911) indican daños en Cali, principalmente en iglesias..." (Tomado de Velásquez & Meyer, 1992), en Rosales (2001).

6 de junio de 1925.

"... Los templos sufrieron graves daños en las frontis, torres, cúpulas, naves y arcos, San Pedro Y San Francisco cerrados pues amenazan desplome. Ermita convertida en despojos, la Torre Santa Librada esta rota y habrá de caerse prontamente. los edificios de mas de un piso requieren costosas reparaciones..." (El Relator, 8 de junio de 1925), en Rosales (2001).

Se sintió en todo el país especialmente en el Occidente colombiano. Daños:

- *Iglesia de San Pedro, Catedral: bóveda cuarteada y los alfiles en la fachada y una parte de la torre se desplomaron.*
- *Ermita de Nuestra Señora de los Dolores, desapareció por completo; el muro que sostenía el óleo del Señor de la Caña quedó en pie.*
- *La antiquísima iglesia de Santa Rosa (situada en el parque del mismo nombre) fue destruida.*
- *Capilla de San Antonio, Iglesia de San Juan de Dios, Hospital San Juan de Dios y el templo de San Nicolás.*
- *La torre Mudéjar de San Francisco no sufrió daños pero la bóveda su sufrió graves daños estructurales (rajaduras de espesor de hasta 5 cm aparecieron en la cúpula lo que hacia prever su desplome).*
- *Muchas casas de particulares se desplomaron, especialmente las mas viejas.*

(Síntesis de daños a partir de Despertar Vallecaucano, No. 20, marzo-abril de 1975: “El terremoto del 7 de junio de 1925”), en *Rosales* (2001). Al parecer este terremoto es la única evidencia de daño sísmico en el barrio San Antonio, del cual se tiene reseña hasta ahora.*



Figura 4. Iglesia La Ermita en Cali, destruida por el terremoto de 1925.

De acuerdo con *Meyer* (1990), los daños observados en la Cali moderna, han sido debidos a singularidades en una u otra edificación y solo han resaltado como más o menos generalizados los efectos en edificaciones de gran volumen, estructura deficiente y poca densidad de muros, como iglesias antiguas, fracturamiento de muros en bloques de vivienda de cuatro y cinco pisos, caída de fachadas sin amarre y enchapados, y daños en líneas vitales aéreas, estos últimos debidos principalmente al efecto de péndulo invertido de transformadores en postes.

* En 1967:02:09 hubo daños en la cercana iglesia del barrio San Cayetano (tal vez hubo daños en casas de San Antonio ?).

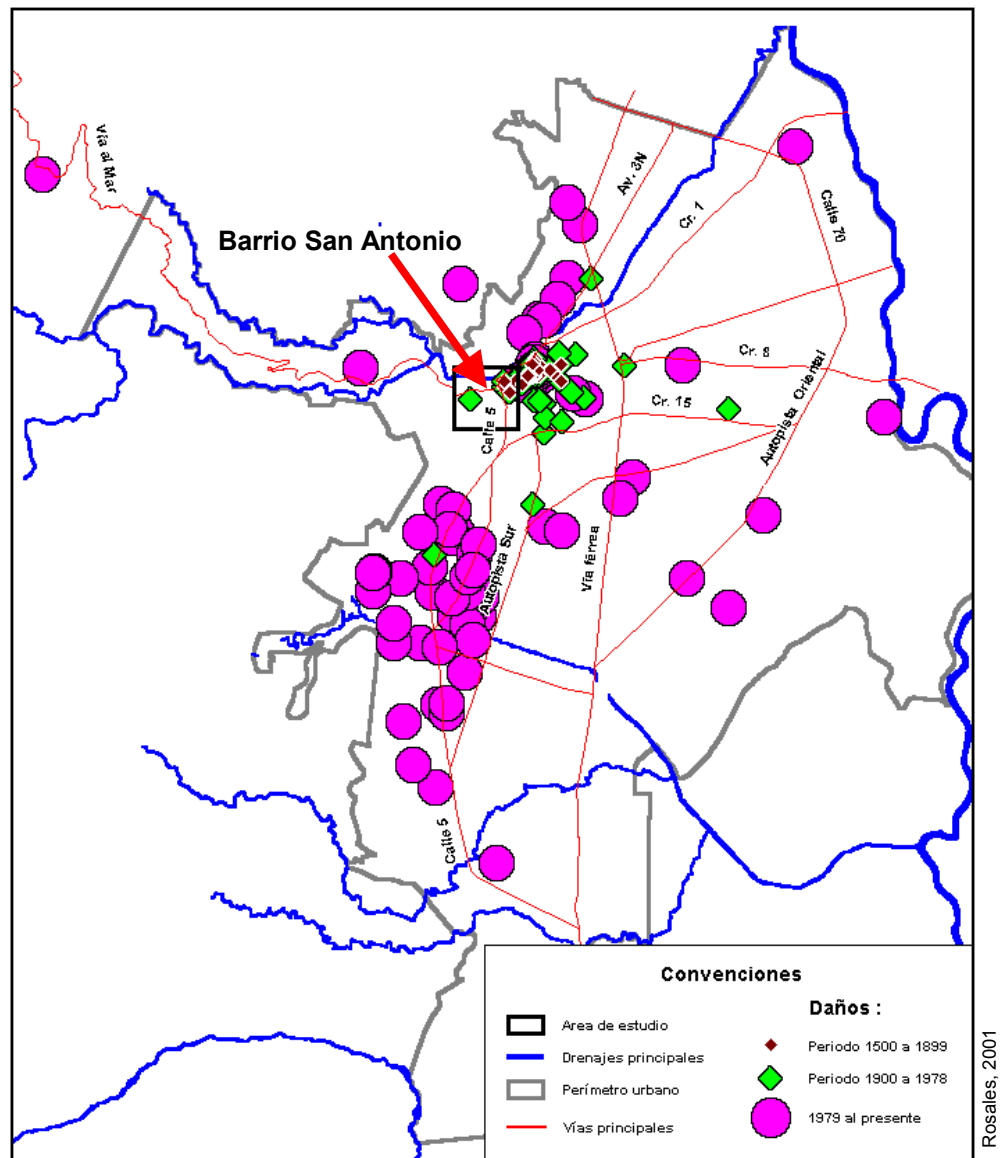


Figura 5. Localización de daños sísmicos en Cali

Tabla 3. Sismos con daños en Cali y sus fuentes sismogénicas.

ID	año:mes:día	LT	Prof.	MM	Mag.	Tipo	N	W	Fuente	Dist. a Cali
1	1566	--	--	VII	5	Ms	3	76.5		51
2	1672-1678	--	--	--	--	--	--	--	--	
3	1688:05:04	--	--	--	--	--	--	--	--	
5	1766:07:09	4:21	--	VIII	6	Ms	3.7	76.3	1	37
8	1884:11:05	23:45	--	--	5	Ms	3.5	76.4		14
9	1885:05:25	15:05	--	VI	6	Ms	2.5	76.5		106
15	1893:11:14	16:15	--	--	3.5	Ms	2.5	76.5		106
19	1906:01:31	10:36	?	?	8.9	Ms	1	81.5	2	617
20	1925:06:07	18:41	170	VII-VIII	6.8	Ms	3	78	2	172
23	1938:02:04	21:23	--	VII	7	Ms	5.1	75.5	3	215
30	1957:05:23	21:37	60	VII	6.7	Ms	3	76.5		51
35	1961:12:20	8:25	176	VI, VI+	6.5	Ms	4.6	75.6	3	163
36	1962:07:30	15:18	69	VII	6.7	Ms	5.2	76.4	3	194
40	1967:02:09	10:24	36	VII	6.3	Mb	2.95	74.8	4	190
54	1976:05:18	23:07	161		5.8	Mb	4.49	75.8		139
57	1979:11:23	18:40	105	VII	6.3	Mb	4.81	76.2	3	154
58	1979:12:12	2:59	24	VI	6.4	Ms	1.6	69.4	2	371
85	1991:11:19	17:28	33		6.0	Mb	4.8	77.4	2	165
95	1992:10:18	15:11	10		6.6	Mb	7.07	76.9	1	407
108	1994:06:06	15:47	12		5.9	Mb	2.91	76.1	1	85
117	1995:02:08	13:40	70		4.9	Mb	4.07	76.6	3	72
122	1995:08:19	16:43	118		4.7	Mb	4.09	75.7	3	190
148	1997:09:02	07:13	203		6.7	Mb	4.02	75.7	3	185
154	1997:12:11	02:56	170		6.2	Mb	4.02	75.9	3	92
161	1999:05:14	21:02	3		3,7	Mb	3,4	76,6	1	14

Fuentes Sismogénicas	
1	Falla cortical superficial
2	Zona de subducción (superficie frente al litoral pacífico)
3	Zona de Wadatti Benniof (60 a 200 km, bajo el Valle del Cauca, sur del Chocó y Eje Cafetero)
4	Fallas del borde llanero, Huila aprox. 33 – 60 km

Fuente: Tomado de Rosales (2001).

Los sismos que han afectado a la ciudad de Cali, son de intensidades entre VI y VII. De acuerdo con Campos (1992) se puede esperar con una alta probabilidad, que en un futuro se repitan eventos de intensidades similares. Los efectos sobre las edificaciones que conforman la ciudad dependen en gran medida del número de pisos de la edificación (debido a sus periodos de vibración), La distancia del sitio donde se produce la liberación de energía o hipocentro, la geología de la zona y la topografía sobre el cual se asientan las edificaciones.

¡Error!Argumento de modificador desconocido.

Elaborado a partir de Rosales, 2001

Figura 6. Efectos de daños sísmicos en el sector de fundación de la ciudad de Cali desde 1556 hasta el presente.

Según la NSR-98, *“hasta finales de la década de 1970 existía la creencia errada dentro de los ingenieros nacionales que los edificios de baja altura no requerían diseño resistente”*. Esto significa que las ciudades colombianas tienen un gran inventario de edificaciones vulnerables frente a la acción sísmica. En la misma norma se menciona que los terremotos del 23 de noviembre de 1979, en el antiguo Caldas, del 12 de diciembre de 1979 en Tumaco y del 31 de marzo de 1983, en Popayán demostraron la deficiencia de la práctica constructiva en Colombia.

El comportamiento de las edificaciones afectadas por sismos ocurridos recientemente en el territorio nacional, se destacan daños estructurales graves que se presentaron en muchas de las edificaciones construidas antes de la vigencia del decreto 1400/83 y así mismo, en edificios construidos después de 1984. Un gran número de estos daños corresponden a las fachadas y muros interiores, es decir, en elementos no estructurales de edificaciones construidas antes y después de la vigencia del CCCSR-84. Además, la gran mayoría de víctimas fueron causadas por elementos no estructurales, desprendidos principalmente de las fachadas.

2.3.3 Escalas de magnitud e intensidad.

Las escalas de magnitud e intensidad se utilizan para cuantificar o medir los terremotos. La escala de magnitud está relacionada con la energía liberada como ondas sísmicas a través del suelo y que es registrado por sismógrafos; la intensidad es la apreciación cualitativa del impacto del evento sísmico en la población, las construcciones y la naturaleza (*Bommer, 1994*).

2.3.3.1 Intensidad.

De acuerdo con Bommer (1984) la primera escala de intensidad conocida fue la desarrollada por Paordini, quien presentó la intensidad de un terremoto ocurrido en el sur de Italia el 30 de julio de 1637 con base en cuatro grados; luego en 1828, Egen desarrolló una escala de cinco grados para medir los efectos del terremoto de la región del Rhin en Alemania. Desde entonces se han propuesto por diversos investigadores más de cincuenta escalas de intensidad entre ellas las de Rossi & Forel en 1883 con 10 grados (*Beles et. al*, 1975 en *Bommer*, 1994), la escala de Mercalli en 1883 modificada por Cancani en 1904, Neumann en 1931, Richter en 1956 (*Richter*, 1958 en *Bommer*, 1994). Esta escala es la que se conoce hoy en día como Mercalli Modificada (MM), la cual tiene 12 grados.

En mayo de 1963, S. Medvedev, W. Sponheuer y V. Karniik propusieron una nueva escala que también tiene 12 grados, que son equivalentes a los 12 grados de la escala de MM. Esta escala se le conoce como MKS, ampliamente utilizada en Europa (*Bommer*, 1994) al igual que la nueva escala macrosísmica europea EMS (1992) que corresponde a la Escala MKS Actualizada (tomado de la red mundial: Escala de intensidad macrosísmica europea. Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. En <http://www.ugr.es/~iag/ems92.html>).

La escala más común en América es la Modificada de Mercalli (MM) mostrda en l tabla 4. Va del grado I (detectado sólo con instrumentos) hasta el grado XII (destrucción total), y corresponde a daños leves hasta el grado V. Como la intensidad varía de punto a punto, las evaluaciones en un lugar dado

constituyen generalmente, un promedio; por eso se acostumbra hablar solamente de grados enteros (Espíndola & Jiménez, *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

Las escalas de intensidad representan únicamente una medida del poder destructivo de un temblor o de los efectos que éste tuvo sobre seres humanos y edificaciones en un lugar determinado. Para un sismo es claro que la intensidad puede variar notablemente de un sitio a otro, dependiendo de la distancia al epicentro y de las condiciones geológicas locales. Es evidente, por tanto, que la intensidad es una medida relativa que da una idea de la severidad con que manifestaron los sismos en diversos sitios, pero no cuantifica la energía liberada de la fuente; (Espíndola & Jiménez. *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

Es común relacionar en un mapa los efectos de un sismo mediante curvas, llamadas isosistas, que representan los lugares donde se sintió la misma intensidad. Generalmente se observan las mayores intensidades cerca de la zona epicentral; aunque, a veces, pueden existir factores, como condiciones particulares del terreno, que ocasionan que un sismo cause mayores daños a distancias lejanas del epicentro. Pueden reportarse mayores intensidades en sitios donde, debido a la concentración de población, un terremoto causará más daños (o al menos serán reportados más daños) que en una región comparativa o totalmente deshabitada (Espíndola & Jiménez. *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en

<http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

2.3.3.2 Magnitud

La intensidad, si bien es útil para describir los efectos de un terremoto, no es un parámetro apropiado para describir la cuantía o magnitud de un sismo al ocurrir un fracturamiento en el interior de la tierra. Fue hasta 1931 cuando el sismólogo japonés Wadati observó, al comparar los sismogramas de diferentes temblores, que la amplitud máxima de las ondas sísmicas registradas parecía proporcional a la dimensión del sismo. Este concepto fue posteriormente desarrollado en 1935 por Charles Richter quien, estableciendo analogías con la medida de brillantez de las estrellas en astronomía, empleó por primera vez el término magnitud para catalogar los temblores.

La escala original de Richter tomaba las amplitudes máximas de ondas superficiales de sismos ocurridos a distancia cortas para calcular lo que él denominó magnitud local o magnitud M_L (Espíndola & Jiménez. *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

Posteriormente, el uso de la escala original de magnitudes de Richter se extendió para calcular magnitudes a grandes distancias, utilizando las amplitudes máxima de ondas P (m_p) o de ondas superficiales (M_S).

La selección de la escala de magnitud más adecuada depende de la magnitud del sismo y de la distancia a la cual se encuentre las estaciones

sismológicas. Para evitar confusiones, sin embargo, la información de magnitud ofrecida al público se da generalmente sin especificar que tipo de escala se utilizó. Algunas veces se crean situaciones confusas, pues se reportan diversos valores de magnitud para un mismo sismo. Esto resulta porque muchas veces M_L , M_b y M_s no tienen valores idénticos para un mismo sismo (*Espíndola & Jiménez. Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

2.3.3.3 Relación entre Intensidad y Magnitud

Como las intensidades son medidas de daños, y éstos están muy relacionados con las aceleraciones máximas causadas por las ondas sísmicas (ver tabla 4), es posible relacionarlos aproximadamente. Una de tantas relaciones es la propuesta por Richter y se muestra en la siguiente ecuación (Richter, C. 1958, en Nava, 1998).

$$\log a \text{ (cm/s}^2\text{)} = I/3 - 1/2$$

Donde I es la intensidad y a es la aceleración del terreno. Esta relación nos dice que una intensidad de XI corresponde a aceleraciones del orden de $1468 \text{ cm/s}^2 = 1.5 \text{ g}$, donde $g = 980 \text{ cm/s}^2$ que corresponde a la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre; una intensidad de IX corresponde a 0.7 g , y una de VII a 0.07 g . Aparentemente la aceleración mínima que percibe el ser humano es del orden de 0.001 g , correspondiente a la intensidad II; las relaciones se muestran en la tabla 5.

Tabla 4. Relación entre Intensidad y Magnitud según Richter (1958).

RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD Y MAGNITUD SEGÚN RICHTER			
Intensidad MM	Magnitud Richter	Característica	Efectos
I	Hasta 2.5	Instrumental	No sentido excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables. Sismo registrado por instrumentos
II	de 2.5 a 3.1	Muy débil	Sentido solo por muy pocas personas en reposo, especialmente en pisos altos de edificaciones. Objetos suspendidos delicadamente pueden oscilar.
III	de 3.1 a 3.7	Ligero	Percibido en áreas densamente pobladas por una parte de la población. Sentido muy sensiblemente por personas dentro de edificaciones, especialmente las ubicadas en los pisos superiores. Muchas personas no se dan cuenta que se trata de un sismo. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como las producidas por el paso de un camión. Duración estimable.
IV	de 3.7 a 4.3	Moderado	Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos. Por la noche algunos se despiertan. Platos, ventanas, puertas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V	de 4.3 a 4.9	Algo fuerte	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas y similares rotos; grietas en el revestimiento de algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
VI	de 4.9 a 5.5	Fuerte	Percibido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Caminar inestable, árboles y materiales se agitan por efecto del sismo. Algunos muebles pesados se mueven; algunos casos de caída de revestimientos por lo general en las construcciones de tipo D se agrietan, chimeneas dañadas. Daño leve.
VII	de 5.5 a 6.1	Muy fuerte	Todo el mundo corre al exterior. Notado por personas que conducen automóviles. Dificultad para mantenerse en pie, objetos colgantes se caen, se pueden producir pequeños derrumbes y deslizamientos. Daño significativo en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras corrientes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas edificios de tipo D ; se rompen algunas chimeneas aras del tejado, caída de cielo rasos, ladrillos, piedras, tejas, cornisas, también antepechos y ornamentos arquitectónicos no asegurados. Se presentan algunas grietas en edificios tipo C .
VIII	de 6.1 a 6.7	Destruyivo	La conducción de vehículos se dificulta, daños de consideración y colapso parcial de edificaciones tipo C , algunos daños en edificaciones tipo B , ningún daño en edificaciones tipo A , caída del repello y algunas paredes de mampostería, caída de chimeneas de fabricas, monumentos y tanques elevados, algunas ramas de árboles se quiebran, cambio de flujo o temperatura de posos de agua, grietas en terreno húmedo y en taludes inclinados, colapso parcial de estructuras, daños considerables en edificios ordinarios.
IX	de 6.7 a 7.3	Ruinoso	Pánico general. Construcciones de tipo D destruidas; daño severo en edificaciones y aún colapso de edificaciones tipo C , daño de consideración en edificaciones tipo B . Daños severos en estructuras tipo A . Daño general en cimientos. Armazones arruinadas. Daños serios en embalses. Tuberías subterráneas rotas. Amplias grietas en el suelo. En áreas de aluvión, eyección de arena y barro; aparecen fuentes y cráteres de arena.
X	de 7.3 a 7.9	Desastroso	Destrucción de la mayoría de las edificaciones, derrumbe de puentes, daños serios en presas y embarcaderos
XI	de 7.9 a 8.4	Muy Desastroso	Pocas estructuras quedan en pie, fisuras en el terreno
XII	de 8.4 a 9	Catastrófico	Destrucción total, grandes masas de roca desplazadas, objetos lanzados al aire

Fuente: Elaborado a partir de Bommer (1994); Nava (1998); Espíndola & Jiménez. *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*.

Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>. *Características de las Construcciones de la tabla.

***Construcciones Tipo A**

Estructuras de acero y hormigón armado, bien diseñadas, calculadas para resistir fuerzas laterales. Buena construcción, materiales de primera calidad.

Construcciones Tipo B

Estructura de hormigón armado, no diseñadas en detalle para resistir fuerzas laterales, buena construcción y materiales.

Construcciones Tipo C

Estructuras no tan débiles como para fallar la unión de las esquinas, pero no reforzadas ni diseñadas para resistir fuerzas laterales. Construcciones y materiales corrientes.

Construcciones Tipo D

Construcciones de materiales pobres, tales como adobe; baja calidad de construcción. no resistente a fuerzas horizontales.

Tabla 5. Relación intensidad – aceleración.

Intensidad MM	Magnitud Richter	Aceleración /g
1	Hasta 2,5	0,001
2	de 2,5 a 3,1	0,001
3	de 3,1 a 3,7	0,003
4	de 3,7 a 4,3	0,007
5	de 4,3 a 4,9	0,015
6	de 4,9 a 5,5	0,032
7	de 5,5 a 6,1	0,07
8	de 6,1 a 6,7	0,15
9	de 6,7 a 7,3	0,323
10	de 7,3 a 7,9	0,695
11	de 7,9 a 8,4	1,498
12	de 8,4 a 9	3,227

Fuente: elaborada a partir de Nava, 1998.

2.3.4 Determinación de los efectos locales.

Las amplitudes y formas de las ondas sísmicas generadas en un sismo dependen del mecanismo focal y de la cantidad de energía liberada en la zona de ruptura. El mecanismo focal controla la manera en que las ondas son irradiadas en el espacio y en el tiempo. No obstante, las ondas sísmicas una vez emitidas por la fuente sufren modificaciones en su trayecto que dependen de las propiedades mecánicas de los medios en que se propagan (estratos de suelo) y de las dimensiones de las irregularidades con que se encuentren (*Sánchez, 1989*).

Si los cambios de las propiedades en una interfase son grandes, o si el tamaño de las irregularidades es comparable o mayor que la longitud de onda predominante de las ondas incidentes, se generaran cambios significativos en el movimiento debidos a reflexión, refracción y difracción de las ondas.

Las ondas sísmicas se amplifican o se atenúan de acuerdo al medio por el cual se propagan y el tipo de irregularidades que encuentren en su trayecto desde la fuente hasta la superficie. Generalmente los estratos de suelos blandos amplifican las ondas sísmicas, a diferencian de los estratos de suelo duros o densos. Ultimamente se ha observado la influencia negativa de la topografía en el comportamiento y resistencia sísmica de las construcciones.

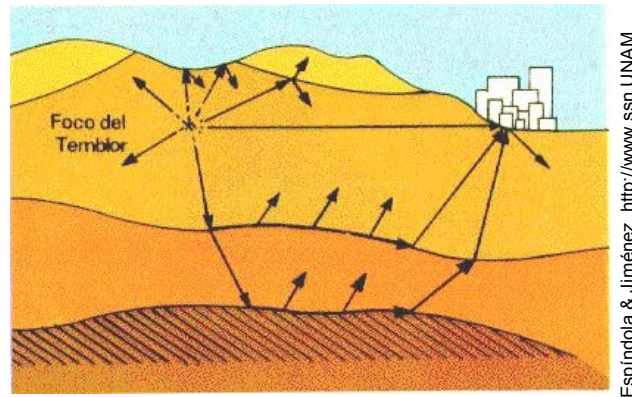


Figura 7. Propagación de las ondas sísmicas

La principal causa de daño sísmico depende de la calidad de las construcciones, pero se ha observado con frecuencia que los daños severos se relacionan con fenómenos de amplificación (Sánchez, 1989). En muchas regiones, las ciudades o poblados están asentados sobre depósitos de suelos blandos y lugares de marcada topografía, que pueden generar efectos locales, aumentando y prolongando el movimiento sísmico del terreno, e intensificando con este fenómeno los efectos sobre las construcciones.

2.3.4.1 Efecto de sitio por la geología.

La experiencia aportada por terremotos pasados, ha demostrado que las condiciones locales del sitio afectan las características del movimiento del terreno, condición que influye significativamente en el daño de las edificaciones. Los estudios sísmicos han mostrado que la intensidad de los efectos sobre las construcciones está directamente relacionada con el tipo de suelo sobre el cual se emplazan. Las edificaciones construidas sobre roca compacta y suelo firme se comportan mejor que aquellas sobre terreno

blandos (*Vidal*, 2001).

El parámetro fundamental del sitio es la geología, porque puede modificar la amplitud y la frecuencia del movimiento. La influencia de depósitos blandos sobre el movimiento fuerte ha sido reconocida durante mucho tiempo: por ejemplo en el terremoto de Calabria, Italia, de febrero de 1783, Sir Willian Hamilton observó que las casas del llano de aluvión sufrieron mayores daños que las casas construidas encima de roca (*Ambraseys*, 1977, en *Bommer* 1994).

Otro antecedente de amplificación sísmica ocurrió el 19 de septiembre de 1985, afectando a las edificaciones construidas sobre suelos blandos en Ciudad de México, donde a una distancia del epicentro de 400 km las aceleraciones fueron significativamente más altas, que en zonas cercanas al epicentro (*Bommer*, 1994).

2.3.4.2 Efecto topográfico.

Las lecciones aprendidas de los sismos recientes muestran que la topografía también puede modificar la respuesta sísmica de las construcciones en una región determinada, generando graves efectos. Las edificaciones construidas en lugares abiertos y con topografía suave son generalmente menos afectadas que las construidas sobre zonas accidentadas o colinas inclinadas, o separadas por grandes elevaciones y terreno abrupto (*Vidal*, 2001).

Existen algunos antecedentes mundiales de daños en construcciones por el efecto topográfico ocurrido como en el terremoto de San Fernando, California, de 1971 (Trifunac & Hudson, 1971; Boore, 1973 en Sánchez, 1989), sur de Italia en 1980 (Siro, 1982, en Sánchez, 1989), terremotos de Loma Prieta en 1989, Northridge 1994, Centro de Chile en 1985 (tomado de la red mundial: Análisis of topographic effects on ground motions at the pleasants valley pumping plant, California. Stewart, en <http://erp-web.er.usgs.gov/reports/annsum/vol40/nc/goo38.htm>), y en Kobe en 1995 (Vidal, 2001).

Un caso más reciente lo constituye el terremoto de Kocaeli, Turquía del 17 de agosto de 1999, donde según Cardona (2000), *"Efectos de sitio, tales como la amplificación por suelo blando y amplificación topográfica, parecen evidentes en lugares como Avellar, cerca a Estambul y Duzce, donde las aceleraciones registradas así lo indican. Sin embargo, el desconocimiento de los tipos de suelos en la mayor parte de la zona afectada y la falta de registros acelerográficos no permiten deducir con certeza que tan generalizada pudo ser la amplificación sísmica. Queda la duda, no obstante, si muchos casos de colapso, un tanto incomprensibles, en muchos casos se pudieran explicar por condiciones de sitio desfavorables que pudieron amplificar notablemente el movimiento"*.

Según el informe de la misión de reconocimiento del terremoto de El Salvador de 2001 (INETER, 2001), en la ciudad de Comasagua el "efecto topográfico" pudo haber influenciado los daños ocurridos, debido a que la ciudad se encuentra en la cima de una colina y en los lados hay profundos

valles de erosión.

El efecto topográfico ha sido un factor reportado como causante de la amplificación de la onda sísmica, en varios eventos alrededor del mundo, pero al parecer en buen número de los casos, ésta deducción parte de las observaciones directas de los efectos de los sismos en las edificaciones. No obstante, existe un alto nivel de incertidumbre en cuanto a la a la real incidencia del efecto topográfico en casos de edificaciones afectadas por sismos, debido principalmente a que no se tienen registros acelerográficos de los lugares afectados, que permitan compararlos con los de zonas de distinta topografía.

Si bien el “*efecto topográfico*” no ha sido tan estudiado, como la amplificación de las ondas sísmicas por la presencia de capas de suelo blando, existen unos pocos trabajos que abarcan el problema de manera numérica. En uno de estos (Suárez & Arroyo, 2001) se encontró a raíz del estudio paramétrico de cientos de casos donde se presentaba amplificación por efecto topográfico, que los factores de amplificación fluctuaban entre 1.00 g y 2.35 g. Es decir, que de incorporarlos a los códigos sísmicos, se incrementaría la aceleración de diseño.



Figura 8. Graves daños en edificaciones construidas en pendiente.
terremoto de Iran 1968.

2.3.5 Amenazas colaterales o efectos de segundo orden

“Las amenazas colaterales incluyen fenómenos causados, como consecuencia de las vibraciones producidas por el sismo; algunas de ellas la ruptura superficial de fallas geológicas, deslizamientos y licuación de suelos, incendios, derramamiento o escape de sustancias peligrosas, e inundaciones por rupturas en tanques, represas y diques” (Campos, 1992).

Se ha observado en numerosos eventos sísmicos la ocurrencia de incendios como por ejemplo en el terremoto de Managua, del 23 de diciembre de 1972 (Bommer, 1994) que ocasionó muchos incendios en varias partes de la ciudad, el control del fuego se dificultó por el colapso de algunas estaciones de bomberos y la ruptura de la red de agua potable.

2.4 VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES

2.4.1 Definición.

La vulnerabilidad sísmica se puede definir como el grado de susceptibilidad de una o un grupo de edificaciones, a sufrir daños parciales o totales, representados en bienes materiales y en vidas humanas, que pueden ocasionar la pérdida de funcionalidad, por la ocurrencia de movimientos sísmicos de una intensidad y magnitud dadas, en un periodo de tiempo y en un sitio determinado.

2.4.2 Causas de la vulnerabilidad sísmica.

Se pueden identificar dos condiciones que hacen vulnerable a un asentamiento, estas son:

2.4.2.1 Vulnerabilidad por origen.

Se define como el grado de susceptibilidad o predisposición de las estructuras físicas, socioeconómicas y medioambientales, constituidas y construidas sin ningún tipo de control ni planificación, las cuales pueden sufrir daño o pérdida a causa de un fenómeno natural.

El acelerado crecimiento de las ciudades y los procesos asociados al "desarrollo", sumado a la creciente demanda de soluciones habitacionales, ha ocasionado un incremento de la urbanización, trayendo como consecuencia la construcción de asentamientos informales localizados en zonas marginales y en terrenos poco aptos para la construcción de

edificaciones, tales como laderas y llanuras, de inundación, construidas sin ningún tipo de asistencia o normatividad técnica siendo vulnerables desde su origen, este tipo de situación se le puede denominar, **Vulnerabilidad por origen**. (Maskrey & Romero, 1986).

2.4.2.2 Vulnerabilidad progresiva.

Se define como el grado de susceptibilidad o predisposición de las estructuras físicas, socioeconómicas y medioambientales, en gran parte transformadas sin ningún tipo de control ni planificación, que pueden sufrir daño o pérdida a causa de un fenómeno natural.

Existen asentamientos que, siendo emplazados en zonas seguras desde su origen, se han vuelto vulnerables con el tiempo debido, por lo general al deterioro de viejas construcciones en áreas densamente pobladas, tales como tugurios, inquilinatos, vecindades, zonas históricas, zonas de deterioro urbanístico, etc, con deficiente calidad constructiva y deterioradas por la falta de mantenimiento; muchas transformadas mediante ampliaciones, demoliciones ó adiciones. También existen asentamientos en donde se pueden encontrar edificaciones que aunque han sido diseñadas y construidas de acuerdo con códigos sísmicos de una determinada época, pueden estar desactualizadas, a la luz de las normas sísmicas vigentes, a estas situaciones se les denomina: **Vulnerabilidad progresiva** (Maskrey & Romero, 1986).

Según *Maskrey & Romero* (1986), tanto la forma de construcción de nuevos asentamientos como el proceso de deterioro de los antiguos, son parte del proceso de transformación de la vulnerabilidad en su conjunto y por lo tanto, deben entenderse como parte integral de ésta. La vulnerabilidad progresiva en los aspectos físicos está íntimamente relacionada con la vulnerabilidad progresiva en los aspectos sociales, económicos y culturales en constante cambio.

2.4.3 Componentes de la vulnerabilidad sísmica.

La vulnerabilidad sísmica puede ser física o funcional *Cardona* (1990) (figura 9), la primera está relacionada con la capacidad que tiene la edificación para comportarse adecuadamente frente a la acción sísmica durante su vida útil y que puede afectar los elementos estructurales que componen el sistema de soporte del edificio (*vulnerabilidad estructural*), al igual que los elementos no estructurales, tales como los componentes arquitectónicos, divisiones, instalaciones, equipos, etc.

La falla de los elementos no estructurales puede causar la inhabilitación del edificio para su buen funcionamiento o para su ocupación temporal (*Vulnerabilidad no estructural*). La segunda está relacionada con la capacidad de la edificación de seguir prestando el servicio para el que fue diseñada y construida.

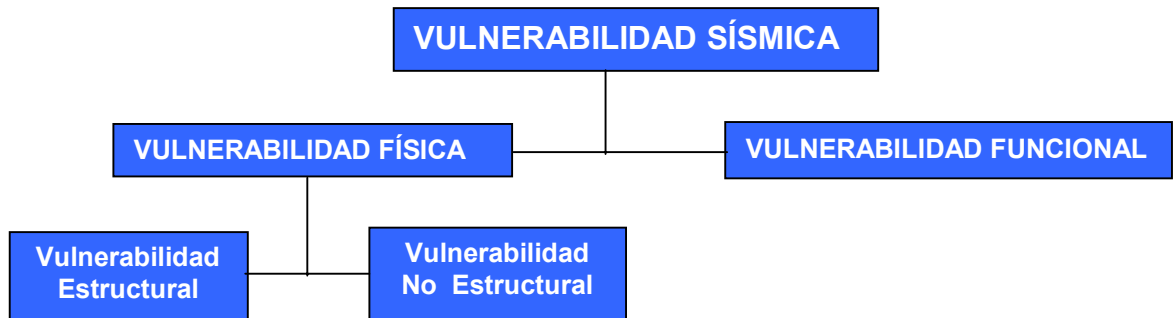


Figura 9. Componentes de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes.

2.4.3.1 Vulnerabilidad física.

La vulnerabilidad física de una edificación o un grupo de ellas, está definida como el grado de susceptibilidad o predisposición de los elementos estructurales y no estructurales a sufrir daño o pérdida, puede ser de tipo estructural o no estructural.

2.4.3.2 Vulnerabilidad estructural.

La vulnerabilidad estructural se define como el grado de susceptibilidad en que pueden afectarse los elementos que componen el sistema de soporte de la edificación (muros de carga, pórticos de concreto o acero, entre otros), los cuales son el resultado de la calidad de la construcción, su estado de conservación, la configuración y forma, así como el tipo de estructura y las características del suelo y la fundación.

- **Calidad de la construcción:** se refiere a la calidad de los materiales utilizados para la construcción, que garantizan una adecuada resistencia y capacidad de la edificación para absorber y disipar la energía sísmica. Materiales frágiles y poco resistentes, con discontinuidades, se rompen fácilmente ante la acción de un terremoto. Así mismo los muros o paredes de tapia de tierra o adobe, de ladrillo o bloque sin refuerzo, sin vigas y columnas, son muy peligrosos (A/S, 2001).



Figura 10. Vivienda construida en materiales de baja calidad.

- **Estado de conservación de la construcción:** se refiere a las condiciones de deterioro representadas en lesiones físicas (humedad, erosión, etc.), mecánicas (deformaciones, grietas, fisuras, desprendimientos, etc.) y químicas (eflorecencias, oxidaciones, corrosiones y organismos como plantas e insectos) y de acuerdo con el *Colegio Oficial de Arquitectos* (1991), pueden ocasionar la pérdida de las propiedades mecánicas y ,por ende, la disminución de la resistencia de los elementos constructivos.



Figura 11. Edificación de bahareque deteriorada en el barrio San Antonio.

- **Configuración y forma de la edificación:** de acuerdo con Cardona (1989), uno de los aspectos de mayor incidencia en el comportamiento de las edificaciones frente a la amenaza sísmica, es su configuración en planta y en altura. Si una edificación posee una forma regular, simétrica y simple, horizontal y verticalmente, con plantas cuadradas o rectangulares no muy alargadas, su comportamiento será mejor que si su configuración es asimétrica, irregular y complicada, como por ejemplo, plantas en forma de L, T, H, entre otras. En general, la asimetría y la falta de regularidad de la edificación puede causar torsiones que a su vez producen concentraciones de esfuerzos en la estructura, generando fallas o rompimientos locales que pueden llegar a comprometer la estabilidad global de la construcción (Cardona, 1989).



Figura 12. Edificación con irregularidad en altura.

- **Tipo de estructura:** generalmente pueden considerarse tres tipos estructurales (*Cardona, 1989*) los conformados por entramados o pórticos de concreto reforzado, acero estructural o madera. También por muros o paredes portantes, normalmente de bloque, ladrillos o paneles y por la combinación de los anteriores, es decir, estructuras compuestas. Se puede decir que los entramados o pórticos de concreto reforzado con vigas y columnas de apreciables dimensiones, unidas monolíticamente, tienen un buen comportamiento sísmico, lo mismo que los entramados metálicos o de madera que ofrezcan buenos amarres o anclajes en las diferentes uniones de sus elementos.

Estructuras cuyos elementos portantes son muros o paredes de bloque o ladrillo confinados por cintas o vigas y columnas de pocas dimensiones que los enmarcan, pueden ofrecer un comportamiento aceptable si la edificación no supera los dos pisos. También son altamente vulnerables muros o paredes de ladrillo cocido, adobe, piedra pegada o tapias de tierra sin elementos de amarre o uniones fuertes.



Figura 13. Edificación de tipo estructural de muros de carga no confinados.

- **Características del suelo y la cimentación:** A pesar que una estructura ofrezca una apariencia de rigidez y resistencia aceptable, puede ocurrir que la misma no pueda soportar en forma adecuada un movimiento sísmico debido a la inestabilidad del suelo sobre el cual fue cimentada. Las vibraciones pueden ocasionar la pérdida de la capacidad de soporte del suelo y, por lo tanto, la estabilidad de la edificación (*Cardona, 1989*).



Figura 14. Edificaciones sobre terrenos inestables, en el Eje Cafetero.

2.4.3.3 Vulnerabilidad no estructural

La vulnerabilidad no estructural se define como el grado de susceptibilidad de los elementos arquitectónicos, tales como cielorrasos, paneles, tabiques, ventanas, puertas cerramientos, áticos, cornisas, adornos, etc., además de equipos e instalaciones eléctricas, mecánicas, hidrosanitarias, entre otros, a sufrir daño o pérdida, ocasionando la inhabilitación temporal o permanente de una edificación para la adecuada prestación de su servicio.

Los elementos no estructurales pueden llegar a convertirse en elementos potencialmente peligrosos cuando no están ligados o amarrados adecuadamente al resto de la edificación, introduciendo cambios en la estructuración y en los mecanismos de transmisión de las cargas, que

pueden propiciar su falla.

2.4.3.4 Vulnerabilidad funcional.

La vulnerabilidad funcional se define como la susceptibilidad de la edificación para seguir prestando el servicio para el que fue construida. Este es un aspecto de máxima importancia en edificaciones cuya función es vital, como es el caso de las edificaciones indispensables (hospitales, clínicas, centros de salud, etc.). Aunque las edificaciones desarrollen un buen desempeño estructural frente a las solicitaciones sísmicas, se puede presentar un "colapso funcional" (*Cardona*, 1989), que puede ser aún más grave que una falla en los elementos de la propia estructura.

2.5 SISMO RESISTENCIA

2.5.1 Definición.

Según la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (A/S, 2001), la sismo resistencia es la propiedad o capacidad que se le provee a una edificación con el fin de proteger la vida y los bienes de las personas que la ocupan. En este sentido, aunque se presenten daños en el caso de un sismo fuerte, una edificación no colapsará y contribuirá a que no se presenten pérdidas de vidas y pérdida total de la propiedad. Una edificación no sismo resistente es vulnerable, es decir susceptible o predispuesta a dañarse en forma grave o a colapsar fácilmente en caso de un terremoto.

2.5.2 Antecedentes históricos.

Según *Barbat* (2001), en las zonas sísmicas del mundo las técnicas de construcción han evolucionado como una respuesta a los desastres producidos de manera repetida por los terremotos. En ese sentido, en muchas de las estructuras antiguas como las construidas por los sumerios, egipcios, griegos y romanos, se reconocen una serie de características comunes que han influido en su comportamiento sísmico, lo que ha contribuido a su permanencia en el tiempo.

Algunas de estas características son su gran peso, parámetro que incrementa considerablemente las fuerzas de inercia y su gran rigidez, con

periodos fundamentales de vibración en el rango de 0,1 s a 0,4 s, lo cual significa que presentan valores similares al de los periodos dominantes de terremotos de campo cercano (*Melli*, 1998, en *Barbat*, 2001).

Según *Kirikov* (1992), en *Barbat* (2001), los principios generales y tradicionales, de diseño sísmico identificados en algunas construcciones y probablemente utilizados por los constructores de la antigüedad fueron:

- Simetría en planta.
- Distribución uniforme del peso y de la rigidez de la estructura.
- Adecuada proporción del dimensionamiento en planta y en altura de las estructuras.
- Buenas conexiones entre los elementos del sistema resistente vertical y horizontal.
- Cimientos rígidos, bien anclados en suelo firme y uniforme. Como alternativa se intentaba reducir los movimientos que se transmitían desde el terreno a la estructura, tratando de desacoplar la base del terreno, dando lugar a sistemas primitivos de aislamiento de base.

Probablemente la alta calidad de los sistemas estructurales antiguos se deba a ensayos experimentales (*Barbat*, 2001), que en la mayoría de los casos, se realizaba sobre estructuras reales, a partir de pruebas de ensayo y error. Hay que tener en cuenta que los constructores de las estructuras antiguas no aplicaban en sus diseños métodos de dimensionamiento con base en la matemática y física, simplemente desechaban las características estructurales que conseguían asociar a los daños sísmicos y aplicaban en

sus construcciones aquellas características que demostraban proporcionar un mejor comportamiento durante terremotos (*Melli*, 1998, en *Barbat*, 2001).

A pesar del actual desarrollo de nuevos materiales y de las técnicas constructivas, los principios utilizados por los antiguos constructores se constituyen en uno de los pilares fundamentales del diseño sismo resistente de nuevas estructuras, al igual que se convierten en la base fundamental para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes.

2.5.3 Principios básicos de la sismo resistencia.

Se dice que una edificación es sismo resistente si está diseñada y construida con una adecuada configuración estructural, con componentes de dimensiones apropiadas y con materiales de una proporción y resistencia suficientes para comportarse satisfactoriamente ante sollicitaciones sísmicas durante su vida útil (*A/S*, 2001).

Teniendo presente que la vulnerabilidad sísmica de una edificación depende principalmente de sus aspectos estructurales, arquitectónicos, constructivos y de su estado de conservación, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una edificación o un grupo de ellas debe partir y fundamentarse, primero que todo, en el conocimiento y comprensión de los principios básicos que rigen su comportamiento sísmico.

Para que una edificación se comporte adecuadamente frente a la acción sísmica su estructura debe ser sólida, simétrica, uniforme, continua y bien

conectada.

Cambios bruscos en su rigidez, falta de continuidad, configuración estructural desordenada o voladizos excesivos, facilitan la concentración de esfuerzos nocivos, torsiones y deformaciones que pueden causar graves daños o el colapso de la edificación, por lo tanto los principios fundamentales que deben regir el comportamiento sísmico de las edificaciones, según la *A/S* (2001) son: la configuración geométrica y estructural, bajo peso, mayor rigidez, buena estabilidad, suelo firme y buena cimentación, estructura apropiada, materiales competentes, calidad en la construcción, capacidad de disipar energía, fijación de acabados e instalaciones, estado de conservación de la edificación.

2.5.3.1 Configuración geométrica.

La geometría de la edificación debe ser sencilla en planta y en elevación. Las formas complejas, irregulares o asimétricas causan un mal comportamiento cuando la edificación es sacudida por un sismo.

Una geometría irregular favorece que la estructura sufra torsión o que intente girar en forma desordenada (*A/S*, 2001). Un edificio con forma de caja, tal como un rectángulo en el plano y en elevación, es más fuerte que otro de forma de **L** ó de **U**, tal es el caso de un edificio con anexos o alas (*CISMID*, 1986).

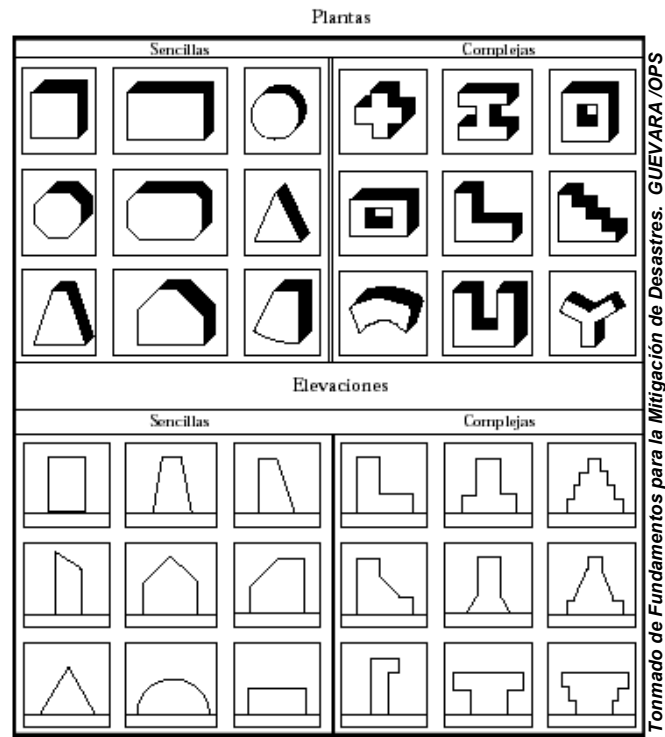


Figura 15. Formas sencillas y complejas en planta y en elevación.



American Masterworks Twentieth 1995

Figura 16. Edificación irregular en planta y altura.

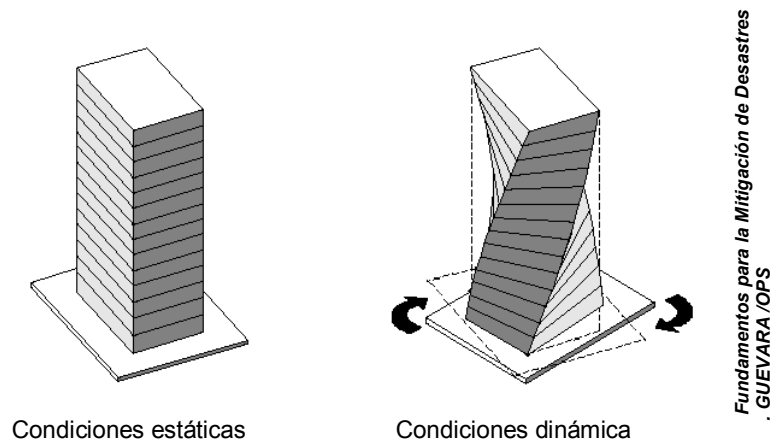


Figura 17. Comportamiento sísmico de edificaciones.

2.5.3.2 Configuración estructural.

Es recomendable que no existan cambios bruscos en las dimensiones de una edificación, ni en distribución de masas, rigideces y resistencia. El principal objetivo de una buena configuración estructural es el de evitar que se produzcan grandes concentraciones de esfuerzos en pisos que son débiles con respecto a otros. Las zonas débiles en altura, por cambio en la rigidez o en la resistencia, pueden producir un efecto de piso blando o flexible.

La capacidad de un elemento estructural vertical para transmitir fuerzas horizontales al terreno, es en gran medida mejorada si la configuración de la edificación es simétrica en planta y en elevación, y si los materiales de construcción y las técnicas de unión son consistentes en todas las partes correspondientes logrando simetría y rigidez torsional (*Hartkopf*, 1985).

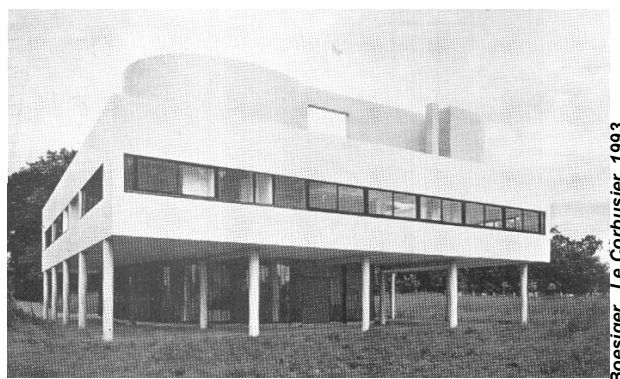


Figura 18. Edificación con piso flexible.

2.5.3.3 Bajo peso.

Entre más liviana sea la edificación menor será la fuerza que tendrá que soportar cuando ocurre un terremoto. Grandes masas o pesos se mueven con mayor severidad al ser sacudidos por un sismo y, por lo tanto, la exigencia de la fuerza actuante será mayor sobre los componentes de la edificación. Cuando la cubierta de una edificación es muy pesada, por ejemplo, ésta se moverá como un péndulo invertido causando esfuerzos y tensiones muy severas en los elementos sobre los cuales está soportada (A/S, 2001).

Reconociendo que las fuerzas de inercia son proporcionales a la masa y, en consecuencia, al peso del edificio, es conveniente que la estructura y los elementos no estructurales tengan el menor peso posible. Es importante observar que en voladizos, o en vigas que tengan luces sumamente grandes, el peso excesivo también puede producir fuerzas de inercia verticales de

magnitud apreciable, que se sumarían a las de la gravedad, las cuales conviene reducir al mínimo (*Bazán*, 1985).



Figura 19. Viviendas construidas en materiales livianos.

Las fuerzas de inercia son proporcionales a la masa de la edificación, por consiguiente, cuanto más liviano es el material usado, menor será la fuerza sísmica (*CISMID*, 1986). No son recomendables altas concentraciones de masa en niveles altos de la edificación debido a elementos pesados, tales como equipos, tanques, bodegas, archivos, etc. El problema es mayor en la medida que dicho nivel pesado se ubica a mayor altura, debido a que las aceleraciones sísmicas de respuesta aumentan también hacia arriba, con lo cual se tiene una mayor fuerza sísmica de respuesta y por ende, una mayor posibilidad de volcamiento o falla.

Es necesario aclarar que mientras menor sea el peso de una estructura, menor serán las fuerzas cortantes que produzcan los sismos, además, se debe tener en cuenta que la aceleración a que se ven sujetos los edificios es mayor en los pisos superiores (*Iglesias*, 1989). De lo anterior se deduce que en zonas sísmicas sería ideal construir edificios ligeros y de poca altura.



Figura 20. Vivienda en ladrillo, con cubierta de teja de barro, edificación relativamente pesada barrio Capri en la ciudad Cali.

2.5.3.4 Mayor rigidez.

Es deseable que la estructura se deforme poco cuando se mueva ante la acción de un sismo. Una estructura flexible o poco sólida al deformarse exageradamente favorece que se presenten daños en paredes o divisiones no estructurales, acabados arquitectónicos e instalaciones que usualmente son elementos frágiles que no soportan mayores distorsiones (CISMID, 1986), por lo tanto, debe existir una simetría estructural estática.

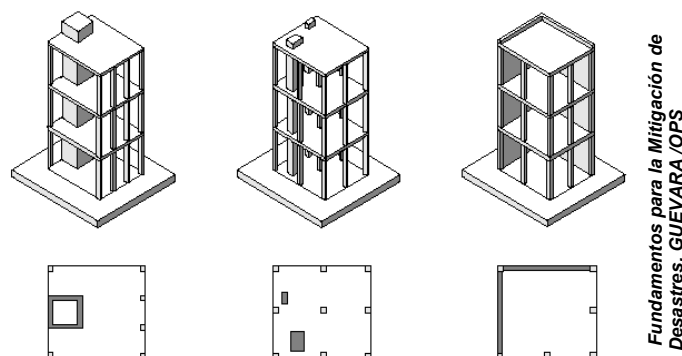
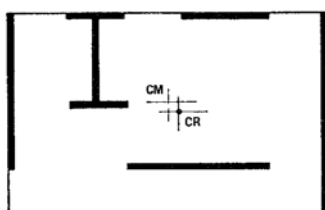


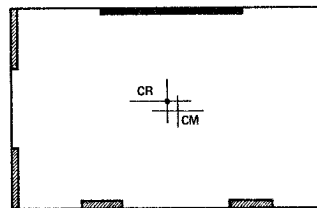
Figura 21. Asimetría estructural.

La asimetría ha sido en muchos casos la causa de fallas mayores en las edificaciones sometidas a sismos, por consiguiente, los elementos que han de soportar la sacudida horizontal no solo deben tener cierta simetría y poseer la resistencia necesaria, sino también deben estar ubicados en un perímetro apropiado y dispuestos unos con relación a otros, para lograr una mayor rigidez (*Hartkopf*, 1985).

En el caso de edificaciones de poca altura, una condición suficiente es que los centros de masa (CM) y centro de rigidez (CR) se hallen lo más cerca posible, para lograr un buen comportamiento sísmico.



Distribución aceptable no simétrica
con elementos del mismo material



Distribución aceptable no simétrica con
elementos contruidos de materiales diferentes

Guidoni & Magni, 1977
en (*Hartkopf*, 1985).

Figura 22. Distribuciones aceptables no simétricas con elementos del mismo material.

La acción sísmica sobre una vivienda se puede presentar en cualquier dirección, por lo tanto, los ejes de los muros deben ser colineales y la mampostería con juntas y pegas continuas. Debe existir aproximadamente la misma longitud de muros en las dos direcciones perpendiculares entre sí.

Una pequeña construcción encerrada por muros apropiadamente unidos funciona como un cajón rígido, su resistencia depende de los muros en una dirección u otra.

Debe existir una continuidad vertical de los elementos de soporte del edificio que cargan todos los pisos que lo componen, desde los cimientos hasta la cubierta. En el caso de las viviendas de dos pisos, es necesario que los muros que cargan la cubierta sean una continuación de los muros del primer piso, de lo contrario se aumentarán las cargas o el peso sobre el primer piso sin contribuir a la resistencia global de la edificación.

Las aberturas que componen los vanos de las viviendas deben estar distribuidas de una forma equilibrada, para evitar concentraciones de esfuerzos indeseables que puedan ocasionar la falla y el daño posterior de la vivienda. En general, las aberturas en muros de una construcción tienden a debilitarlos, y cuantas menos sean, menor será el daño que sufrirá durante un terremoto. (*CISMID*,1986).

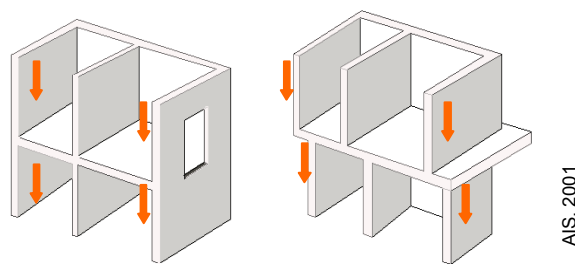


Figura 23. Continuidad y discontinuidad vertical de muros en una edificación.

2.5.3.5 Buena estabilidad.

Las edificaciones deben ser firmes y conservar el equilibrio cuando son sometidas a las vibraciones de un terremoto. Estructuras poco sólidas e inestables se pueden volcar o deslizar en caso de una cimentación deficiente. La falta de estabilidad y rigidez favorece que las edificaciones vecinas se golpeen en forma perjudicial, si no existe una suficiente separación entre ellas.



Figura 24. Colapso de una edificación de bahareque por falta de estabilidad.

2.5.3.6 Suelo firme y buena cimentación.

El objetivo esencial de una cimentación durante un terremoto, es el de transmitir al suelo las acciones resultantes de las fuerzas generadas por un sismo en la superestructura y soportar adecuadamente los esfuerzos provenientes del suelo circundante (*Bazán, 1985*).

Es deseable que el material del suelo sea duro y resistente, debido a que los suelos blandos amplifican las ondas sísmicas y facilitan asentamientos

nocivos en la cimentación que pueden afectar a la estructura y facilitar el daño. Las construcciones que son estructuralmente fuertes para soportar los sismos algunas veces fallan debido a un diseño inadecuado de la cimentación. El volteo, fisuramiento y falla de la superestructura puede ser el resultado de la licuefacción de los suelos y el asentamiento diferencial de los cimientos (*CISMID*, 1986).

Cierto tipo de cimientos son más susceptibles al daño que otros, por ejemplo, columnas con zapatas aisladas son más susceptibles de ser sujetas a asentamientos diferenciales, particularmente cuando se trata de suelos blandos o heterogéneos vertical y lateralmente. Tipos mixtos de cimentación dentro de una misma edificación también pueden causar daño debido al asentamiento diferencial (*CISMID*, 1986).



Figura 25. Pérdida de la capacidad portante del suelo por licuación, Nigata (Japón) 1964.

2.5.3.7 Estructura apropiada.

Para que una edificación soporte un terremoto, su estructura debe ser sólida, simétrica, uniforme, continua o bien conectada. Cambios bruscos de dimensiones, de rigidez, falta de continuidad, configuración estructural desordenada o voladizos excesivos, facilitan la concentración de fuerzas nocivas, torsiones y deformaciones que pueden causar graves daños o el colapso de la edificación (A/S, 2001).



Figura 26. Colapso de una edificación por deficiencias en su estructuración

2.5.3.7 Materiales competentes.

Los materiales deben ser de buena calidad para garantizar una adecuada resistencia y capacidad de la estructura para absorber y disipar la energía que el sismo otorga a la edificación cuando se sacude. Materiales frágiles, poco resistentes o con discontinuidades se rompen fácilmente ante la acción de un terremoto. Muros o paredes de tapia de tierra o adobe, de ladrillo o bloque sin refuerzo, sin vigas y columnas, son muy peligrosas (A/S, 2001).



Figura 27. Colapso de una edificación por falta de confinamiento en el terremoto del 25 de enero de 1999 en el Eje Cafetero.

2.5.3.8 Calidad en la construcción.

Se deben cumplir requisitos de calidad y resistencia de los materiales y acatar las especificaciones de diseño y construcción. La falta de control de calidad en la construcción y la ausencia de supervisión técnica ha sido la causa de daños y colapsos de edificaciones que aparentemente cumplen con otras características o principios de la sismo resistencia (A/S, 2001).

Los sismos descubren los descuidos y errores que se hayan cometido al construir. En muchos lugares las fallas de las construcciones por un terremoto han sido atribuidas a la pobre calidad de la construcción, a materiales de bajo estándar y a mano de obra deficiente (CISMID, 1986).



Ing. Harold Trujillo, 1999

Figura 28. Colapso del hospital del Municipio de Córdoba Quindío, por deficiencias constructivas, terremoto del 25 enero de 1999 en el Eje Cafetero.

2.5.3.9 Capacidad de disipar energía.

La capacidad de disipación de energía de una estructura depende de la estructuración del edificio y del comportamiento de los materiales, elementos y conexiones estructurales (*Bazán*, 1985). Por lo tanto, una estructura debe ser capaz de soportar deformaciones en sus componentes sin que se dañen gravemente o se degrade su resistencia, es decir, que la estructura debe ser dúctil.

La condición opuesta a la ductilidad es la fragilidad, la cual proviene de la utilización de materiales que son inherentemente frágiles ó por el diseño equivocado de las estructuras, donde se usan inadecuadamente materiales dúctiles. Los materiales dúctiles se fisuran debido a las cargas, entre estos se encuentran el adobe, el ladrillo, y el bloque de concreto. Cuando una

estructura no es dúctil, ésta se rompe fácilmente al iniciarse su deformación por la acción sísmica (*CISMID*, 1986).

La mayoría del daño durante los terremotos pasados estuvo en las estructuras de mampostería no reforzada construida de materiales frágiles, pobremente unida, que al degradarse su rigidez y resistencia, pierde su estabilidad y puede colapsar súbitamente (*CISMID*, 1986). La adición de refuerzos de acero puede dar ductilidad a los materiales frágiles.



Figura 29. Edificio moderno de estructura aporticada.

2.5.3.10 Fijación de acabados e instalaciones.

Los componentes no estructurales como tabiques divisorios, acabados arquitectónicos, fachadas, ventanas, e instalaciones deben estar bien adheridos o conectados, no deben interactuar con la estructura. Si no están bien conectados se desprenderán fácilmente en caso de un sismo. También pueden sufrir daños si no están suficientemente separados, es decir, si interactúan con la estructura que se deforma lateralmente ante la acción de un sismo (*A/S*, 1998).



Figura 30. Falla en elementos estructurales mal conectados o diseñados.

2.5.3.11 Estado de conservación de la edificación.

El estado de conservación de una estructura puede comprometer su integridad y estabilidad frente al fenómeno sísmico, si no ha sido objeto de acciones de mantenimiento durante su vida útil. El grado de deterioro de una edificación no solamente depende de las medidas de mantenimiento que se tomen a lo largo del tiempo; también puede tener sus orígenes desde la concepción misma del proyecto constructivo de la edificación

"Las estructuras se comportan tal como se construyen más no como se diseñan...", (Muñoz et, al, 2000). De acuerdo con lo anterior, si desde el inicio de la construcción no se toman las medidas pertinentes para garantizar la "durabilidad" de la estructura en el tiempo, ésta se verá sujeta a deterioro. Tan importante como la capacidad resistente, es que la estructura tenga buen desempeño a lo largo de su vida útil, es decir, que sea durable (CISMID, 1986).



Figura 31. Vivienda en mal estado de conservación en el barrio San Antonio.

2.5.4 Ductilidad, deformabilidad y capacidad de absorber daño.

Las propiedades deseables de una construcción sismo resistente, incluyen la ductilidad, la deformabilidad y la capacidad de absorber daño. La ductilidad y la deformabilidad son conceptos interrelacionados, que significan la capacidad de una estructura para desarrollar grandes deformaciones sin colapsar.

La capacidad de absorber daño de una estructura es aquella que le permite soportar daño sustantivo sin colapsar parcial o totalmente. Esto es deseable ya que significa que las estructuras puedan absorber mas daño, y permiten observar las deformaciones y repararlas, o proceder a la evacuación, antes del colapso. (CISMID, 1986).

2.5.4.1 Ductilidad.

De acuerdo con *Bazan & Meli*, (1985), la ductilidad se define como la relación del desplazamiento último o del colapso sobre el desplazamiento del primer daño o de fluencia. Algunos materiales como el acero, hierro forjado y la madera son intrínsecamente dúctiles. Otros materiales como el hierro fundido, la mampostería simple, el adobe o concreto simple no son dúctiles (frágiles), con frecuencia se rompen repentinamente.

Los materiales frágiles pueden hacerse dúctiles, usualmente mediante la adición de pequeñas cantidades de materiales dúctiles. Tal es el caso de elementos de madera adicionados a construcciones de adobe o refuerzos de acero en construcciones de mampostería y concreto (*Bazan & Meli*, 1985).

2.5.4.2 Deformabilidad

Se define como la capacidad de una estructura para desplazarse o deformarse considerablemente sin colapsar. Además, inherentemente confiando en la ductilidad de los materiales y los componentes, la deformabilidad requiere que las estructuras sean bien proporcionadas, uniformes y bien amarradas, para que las concentraciones de esfuerzos excesivos sean evitadas y las fuerzas sean capaces de ser transmitidas de un componente otro, aún, a través de grandes deformaciones (*Bazan & Meli*, 1985).

Aún cuando los materiales dúctiles estén presentes en suficiente cantidad en los componentes estructurales como las vigas o muros, la deformabilidad

estructural total requiere que la irregularidad geométrica y material sea evitada. Es decir, que estos componentes deben tener apropiadas relaciones en su aspecto y forma, por ejemplo, no ser demasiado altos, y estar adecuadamente conectados. Un muro en mampostería, debe tener suficientes muros de amarre y debe estar amarrado a los pisos, al techo y a los muros de corte. Los apoyos de las vigas deben ser adecuados y firmes, para que pequeñas deformaciones no hagan que se caiga o se salga de su apoyo, de manera que resista grandes deformaciones y movimientos dinámicos sin colapsar (*Bazan & Meli, 1985*).

2.5.4.3 Capacidad de absorber daño.

La capacidad para soportar daño es también una cualidad deseable en una construcción y se refiere a la capacidad de una estructura a sufrir daño importante sin tener colapso parcial o total. La clave para lograr esa cualidad es la redundancia estructural, es decir, la provisión de varios apoyos de los miembros estructurales clave, tales como las vigas, y la supresión de columnas centrales por muros portantes en proporciones excesivamente grandes en una edificación (*Bazan & Meli, 1985*).

2.6 CAUSAS DE DAÑO SÍSMICO EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA

Las cargas de diseño sísmico son extremadamente difíciles de determinar, debido a la naturaleza aleatoria de los movimientos sísmicos. Sin embargo, las experiencias de los terremotos fuertes del pasado han demostrado que las prácticas de diseño razonables y prudentes pueden mantener un edificio seguro durante un terremoto.

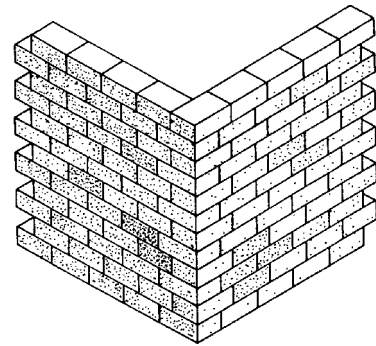
Elementos estructurales tales como muros, vigas y columnas que soportan cargas verticales, al ser sometidos a la acción de cargas sísmicas deben ser capaces de resistir los esfuerzos de flexión y cortante que se generan. Es aquí donde las propiedades y calidad de los materiales de construcción desempeñan un papel importante dentro de la resistencia sísmica de la edificación, en la medida de que estos sean capaces de disipar energía (*CISMID, 1980*)

2.6.1 Clasificación de las construcciones de mampostería.

Según la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica A/S (2001), las viviendas pueden clasificarse en tres tipos dependiendo del sistema constructivo de los muros de soporte principales, del cual dependerá el adecuado comportamiento de las edificaciones de mampostería frente a las sollicitaciones sísmicas y el tipo de daño. Esta clasificación se muestra a continuación.

2.6.1.1 Mampostería no reforzada.

Son las construcciones que utilizan unidades de mampostería en la cual no se considera ningún tipo de refuerzo interno o externo de confinamiento.

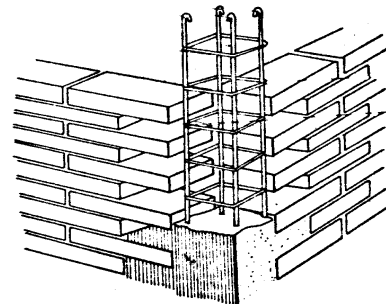


Detalle de un muro de adobe sin confinar

Figura 32. Vivienda en mampostería no confinada.

2.6.1.2 Mampostería confinada.

El método de construcción de mampostería de muros confinados se basa en la colocación de unidades de mampostería conformando un muro que luego se confina con vigas y columnas de concreto reforzado vaciadas en el sitio.



Detalle de muro confinado

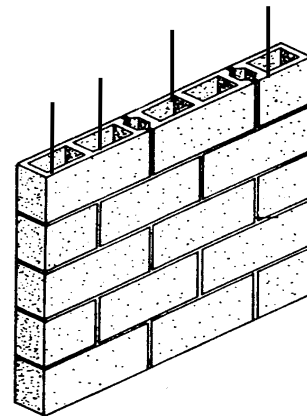
Figura 33. Edificación de mampostería Confinada.

2.6.1.3 Mampostería reforzada.

El sistema de mampostería reforzada se fundamenta en la construcción de muros con piezas de mampostería de perforación vertical (de arcilla o de concreto) unidas por medio de mortero, reforzadas internamente con barras y/o alambres de acero. Este sistema permite la inyección de todas sus celdas con mortero de relleno, o de solo las celdas verticales que llevan refuerzo. El refuerzo se distribuye dependiendo la demanda impuesta al muro en cuanto a cargas externas.



Sociedad de Mejoras Públicas, 1998



Detalle de muro en mampostería reforzada

Figura 34. Vivienda en mampostería reforzada.

2.6.2 Fallas y daños típicos de construcciones de mampostería.

El daño sísmico de una vivienda en mampostería depende de parámetros como la intensidad, la duración, el contenido de frecuencia del movimiento sísmico, la condición geológica y del suelo, la calidad de la construcción, y el estado de conservación, entre las más importantes (*CISMID*, 1986).

Los elementos constructivos más susceptibles a sufrir daño en viviendas de mampostería son las cubiertas, las losas de entrepiso, los muros portantes y divisorios y los elementos no estructurales tales como áticos, cornisas, antepechos y adornos.

2.6.2.1 Causas de falla sísmica en viviendas de mampostería

Las causas de falla que pueden ocasionar daños sísmicos en este tipo de estructuras son:

1. **Anclaje insuficiente.** Debido a la falta de anclajes efectivos, las paredes, antepechos, áticos y cornisas pueden caerse fácilmente (ATC-21,1988), en *Campos*,1992).
2. **Deflexión excesiva de los diafragmas.** Los diafragmas de madera o de materiales muy livianos y por lo tanto muy flexibles, permiten deflexiones no uniformes en su propio plano y significativas para las paredes perpendiculares a la dirección del sismo. La gran deflexión (deriva) producida al nivel de cubierta, puede causar el colapso del muro de mampostería debido a su propio peso (ATC-21 ,1988, en *Campos* ,1992).
3. **Baja resistencia a cortante.** Con frecuencia el mortero empleado tiene muy poco cemento y por lo tanto baja resistencia a cortante. Los muros portantes contruidos con este tipo de mortero, sufren grandes daños y colapsan bajo cargas altas, al igual los muros contruidos por unidades de adobe de baja calidad (ATC-21,1988, en Campos 1992).

4. **Esbeltez de los muros.** Cuando las edificaciones tienen muros altos y delgados, especialmente en paredes no portantes, puede ocurrir pandeo fuera de su plano bajo cargas laterales altas. La caída de un muro no portante, en todos los casos, representa una amenaza para la vida. En el caso de que sea portante, su falla puede comprometer parcial o totalmente la estabilidad de la estructura (ATC-21, 1988, en *Campos*, 1992).
5. **Falta de conexiones.** Los muros que se cruzan ortogonalmente no tienen conexiones o son inadecuadas, lo que impide un buen comportamiento estructural (ATC-21, 1988, en *Campos*, 1992).
6. **Peso de la edificación.** Edificaciones pesadas y muy rígidas generan grandes fuerzas sísmicas de inercia (*CISMID*, 1986).
7. **Concentración de esfuerzos.** Principalmente en las esquinas de ventanas y puertas (*CISMID*, 1986).
8. **Rigidez deficiente.** La edificación no cumple con la cantidad de muros portantes en cada una de sus direcciones.
9. **Configuración geométrica en planta.** Edificaciones muy alargadas, o con formas irregulares como U, L, T, ó H.
10. **Configuración geométrica en altura.** Edificaciones con notables irregularidades en altura que pueden generar torsión (concentración de

masas).

11. **Configuración estructural.** Ésta se presenta por la falta de continuidad vertical de los muros portantes desde la cimentación hasta la cubierta (A/S, 2001).
12. **Calidad de la construcción.** Baja calidad de los materiales, juntas deficientes en la mampostería, muros sin plomar (CISMID, 1986).
13. **Estado de conservación.** Principalmente por el deterioro de cubiertas, grietas en muros portantes debido a la existencia de daños acumulados por sismos anteriores, o a problemas de asentamientos del terreno.
14. **Suelo y cimentación.** La edificación está asentada sobre suelos blandos, o sobre pendientes inclinadas.
15. **Falta de confinamiento.** La edificación no cuenta con elementos de amarre como vigas y columnas, que le garanticen un adecuado comportamiento sísmico.
16. **Adiciones.** La edificación presenta muros en otros materiales que comprometen la estabilidad del conjunto, o que se convierten en un peligro para las personas cuando estos no están debidamente amarrados.

De acuerdo con *Campos* (1992), la falla de un muro portante en una construcción de mampostería de uno o dos pisos, constituye un serio riesgo de colapso total, debido a que el muro averiado es fundamental en el sistema portante; comparativamente, en un edificio de concreto reforzado, la avería o destrucción de un muro, difícilmente llega a comprometer la estabilidad global de la construcción.

2.6.3 Daños típicos de construcciones de mampostería.

La generación de esfuerzos de tracción y corte en muros de edificaciones de mampostería es la causa principal de diferentes tipos de daño que sufren dichas edificaciones (*CISMID*, 1986).

2.6.3.1 Daños en elementos no estructurales.

1. Rotura y volcamiento de parapetos, antepechos de mampostería, voladizos, cornisas, balcones y adornos.
2. Caída del enlucido de las paredes, enchapes y cielos falsos.
3. Rotura y volcamiento de muros de división, de rellenos.
4. Rotura de ventanales de vidrio.
5. Desprendimiento de aleros y caída de tejas.

2.6.3.2 Daños en elementos estructurales (muros portantes).

Este tipo de daño se caracteriza por la generación de fisuras diagonales, debido a esfuerzos de compresión o tracción diagonal, que pueden ocurrir siguiendo la unión de bloques o en diagonal, a través de las unidades de

mampostería. Estas fisuras generalmente se inician en las esquinas de las aberturas y algunas veces al centro de segmentos del muro. Esta clase de daño puede ocasionar el colapso parcial o completo de la edificación.

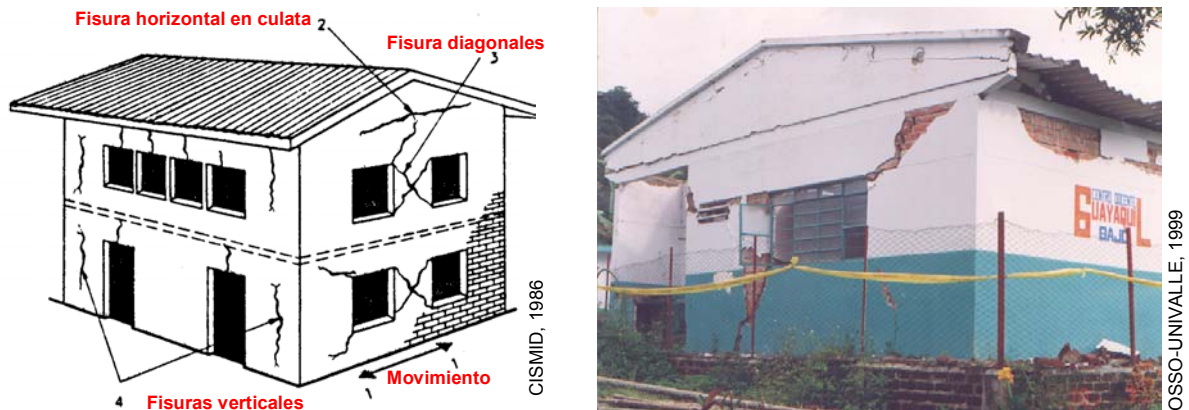


Figura 35. Fisuramiento de muros portantes.

2.6.4 Comportamiento típico de las edificaciones en adobe frente a los sismos

De acuerdo con *CERESIS* (2001), en los terremotos ocurridos en el Perú, las viviendas de adobe han demostrado un comportamiento deficiente, incluso en sismos moderados han colapsado muy rápido. El comportamiento frágil de estas viviendas, se debe a que no tienen un refuerzo que controle el tamaño de las grietas, lo cual produce una súbita pérdida de la rigidez lateral, convirtiéndose la vivienda en un sistema muy flexible y con gran masa, lo cual genera el colapso, ya que las fuerzas sísmicas se incrementan notablemente.

Antes del efecto del sismo en las viviendas de adobe, estas son muy rígidas, pero al agrietarse, se incrementa el periodo natural de vibración, sin llegar a sobrepasar al periodo predominante del sismo, por lo que la respuesta estructural también aumenta (CERESIS, 2001).



Obtenido en la Red Mundial <http://www.costos.peru.com>

Figura 36. Vivienda de adobe destruida por el terremoto de Arequipa de 2001.

2.6.4.1 Tipos de fallas de estructuras en tierra.

Las principales causas de daño en edificaciones construidas en tierra (adobe ó tapia), son debidas a los efectos de configuración estructural, debilidad del terreno de cimentación, debilidad en muros y marcos, carencia de interconexiones adecuadas entre elementos y la calidad de la construcción, entre otras. Algunas causas que propician estas fallas son:

- **Cimientos insuficientes:** la interacción suelo-estructura apenas ha sido comprendida en este siglo. Las construcciones anteriores tienen cimientos dictados por la tradición y el precedente, pero atendiendo más al tamaño de la estructura que a la calidad del suelo. Por otra parte, se sabe de la amplificación que depósitos aluviales blandos producen en las

ondas sísmicas con efectos desastrosos en las edificaciones (*Espinoza, 1985*).

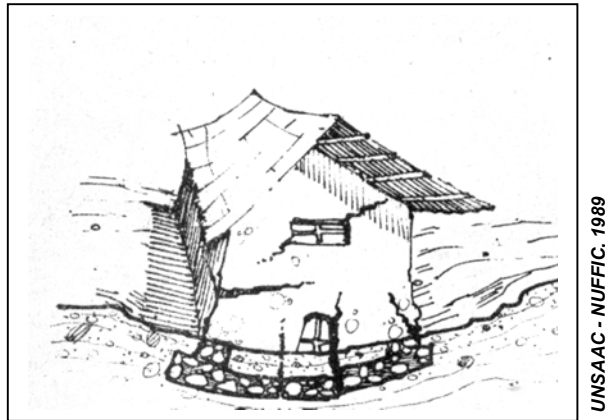


Figura 37. Vivienda en adobe con cimientos insuficientes.

- **Humedad en los muros:** Por efecto de la succión capilar los muros en tierra tienden a absorber humedad del suelo subyacente. En condiciones de humedad la tierra puede regresar a su estado plástico y ocasionar la falla del muro en la misma forma de un talud de suelo (*Espinoza, 1985*).

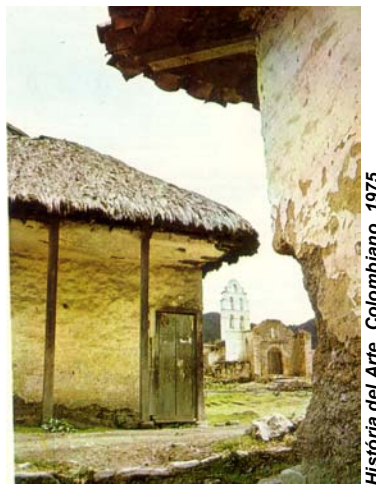


Figura 38. Deterioro de muros de adobe por humedad.

- **Falta de continuidad.** La falta de continuidad en la estructura y, más aún, los cambios de rigidez, producen efectos nocivos porque las masas de diferentes características reaccionan de manera diferente ante el temblor. En Popayán, por ejemplo, se vieron estos resultados en la caída de las torres de San Francisco, Santo Domingo y la avería de la Torre del Reloj (*Espinoza, 1985*).



Figura 39. Avería en templos religiosos en Popayán debido al sismo del 31 de marzo de 1983.

- **Aberturas.** Las aberturas de las puertas y ventanas originan el debilitamiento de los muros. Ante la sollicitación de cargas sísmicas en estos puntos se producen concentraciones de cargas superiores a la resistencia del adobe o la tapia pisada. En las casonas de Popayán las aberturas para las puertas o grandes ventanas e, inclusive, para incrustar armarios en las paredes, efectuadas en remodelaciones sucesivas a lo largo de los años, condujeron al agrietamiento severo o a la falla de alguna de ellas (*Espinoza, 1985*).



Figura 40. Edificación con gran cantidad de vanos, afectada por el terremoto de Popayán el 31 de marzo de 1983

- **Juntas de construcción.** En adobe y tapia pisada las juntas de construcción dejadas en las esquinas, o entre jornadas de trabajo, o entre pega y pega, se marcan cuando se contrae el material. Como consecuencia, el muro de cierta antigüedad está conformado por un conjunto de bloque sueltos entre sí y mantenidos en su posición por el peso y el efecto confinante de la estructura de madera de la cubierta. Una estructura conformada de tal manera resiste, más o menos adecuadamente, fuerzas verticales estáticas pero no puede resistir fuerzas horizontales cíclicas como las de un sismo (*Espinoza, 1985*).



Figura 41. Vivienda de adobe, en el Perú, con deficiencias constructivas.

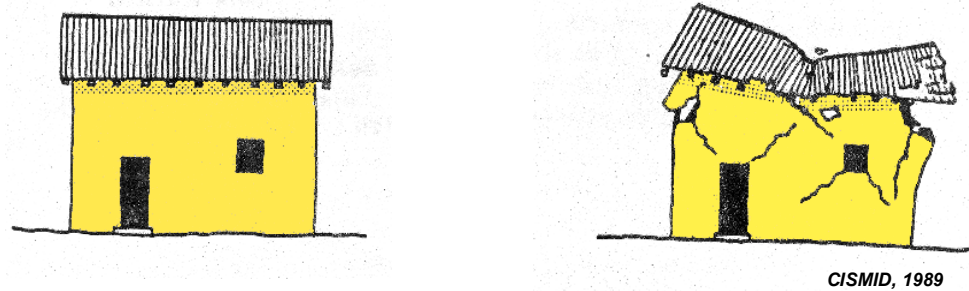


Figura 42. Falla típica de una construcción en adobe.

- ***Inserción de entrepisos.*** Otra fuente considerable de debilidad resulta de la inserción de entrepisos en los muros. El estrechamiento efectivo del muro producido por los maderos en él embebidos equivale a una rótula preformada (*Espinoza, 1985*).

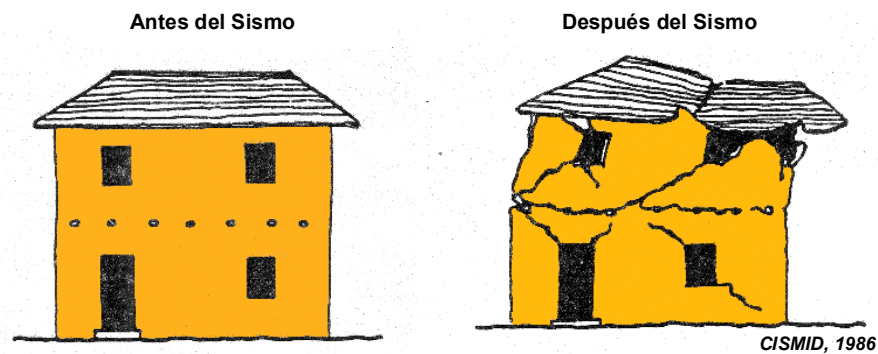


Figura 43. Daño típico de una edificación de adobe dos pisos no reforzada.

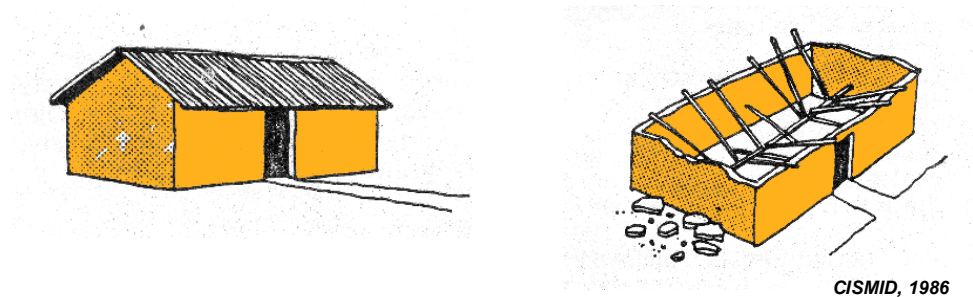
- ***Cubiertas deterioradas.*** Con base en las experiencias de Popayán y El Eje Cafetero se observó que muchos de los muros de las casas se cayeron hacia fuera, sobre la calle, empujados por la estructura de cubierta. Se comprende que si las cabezas de los tirantes están podridas, como es habitual que ocurra, por las particulares condiciones de

humedad y de la falta de aireación en esta zona de cubierta, un sobreesfuerzo causado por el sismo las rompe, y la estructura se abre y ocasiona la falla de los muros previamente debilitados.



Castrillón, 1983

Figura 44. Colapso de cubiertas pesadas en construcciones de adobe, debido al terremoto de Popayán del 31 de marzo de 1983.



CISMID, 1986

Figura 45. Falla típica de colapso de cubierta en edificaciones de adobe.

- **Modificaciones y mutilaciones.** Las remodelaciones que frecuentemente se hacen en las edificaciones antiguas, sin consultar la configuración estructural ni el balance de la solución, terminan siendo mutilaciones. El mismo valor artístico, arquitectónico y monumental queda comprometido.



Figura 46. Viviendas destruidas por el terremoto de San Juan, Argentina, en 15 de enero de 1944.

En el grafico siguiente, se muestra un resumen de las principales fallas que pueden ocasionar daño sísmico en edificaciones de mampostería de adobe.

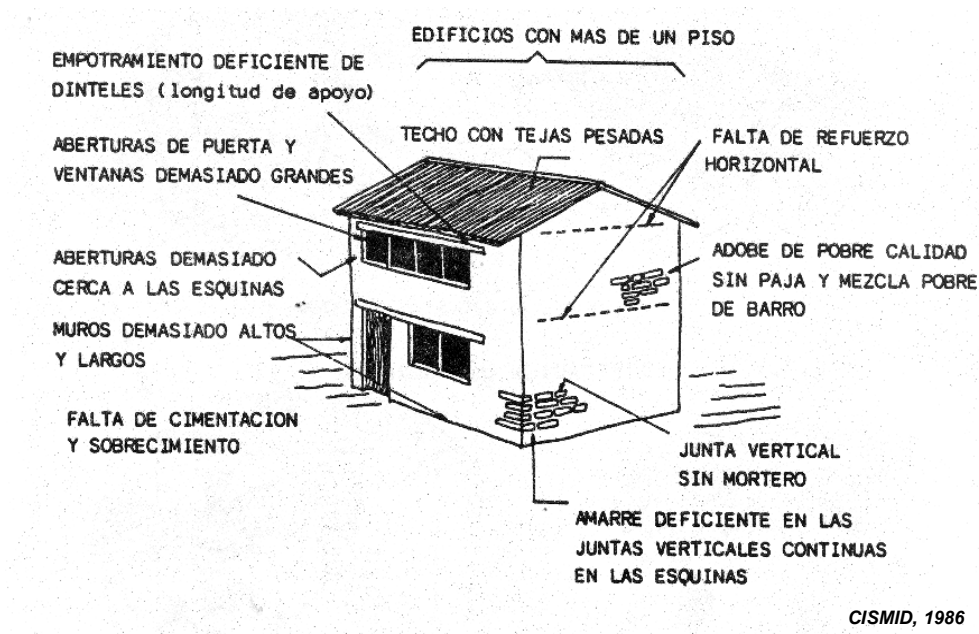


Figura 47. Causas de falla típicas en edificaciones construidas en tierra.

2.7 EFECTOS DE SISMOS EN EDIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN TRADICIONAL

Los efectos ocasionados por sismos en edificaciones de construcción tradicional en Latinoamérica, han dejado a lo largo de los siglos innumerables perdidas económicas y de vidas materiales, convirtiendo a muchas regiones “en grandes laboratorios de destrucción, a escala real”, reincidiendo en muchas ocasiones, como si no se hubiese aprendido bien la lección.

Las edificaciones que por lo general han salido mal libradas, están conformadas por aquellas cuyas prácticas constructivas responden a técnicas tradicionales, muchas de ellas introducidas a América por los conquistadores.

En la costa Perú por ejemplo, según *Maskrey & Romero* (1986), existían centros urbanos antes de la conquista española, como Pachacamac y Huaycán en la zona de Lima, que fueron construidos en materiales de tierra. A pesar de la vulnerabilidad sísmica intrínseca que tiene este material de construcción, hay estudios que han señalado que tanto la forma de utilizar la tierra como la forma de construir, daban un cierto nivel de seguridad a las construcciones pre-colombinas.

En Colombia, por ejemplo, las técnicas constructivas precolombinas con base a materiales livianos (madera, paja) en general garantizaban una mejor seguridad frente al fenómeno sísmico, pero eran susceptibles a otro tipo de amenazas como los incendios.

Lamentablemente, no se conocen estudios realizados sobre desastres sísmicos en ciudades precolombinas. Sin embargo, de acuerdo con *Maskrey & Romero* (1986), la forma de la construcción española que se introdujo a partir de la conquista del territorio americano, incorporo nuevas técnicas y formas de construir desarrolladas en regiones donde los fenómenos sísmicos no ocurrían con frecuencia o con gran intensidad (España, por ejemplo). Tanto la forma de los adobes como el modelo de construcción, con techos pesados de tejas, otorgaba una vulnerabilidad sísmica muy alta a las nuevas edificaciones.

En los últimos años en Latinoamérica las construcciones tradicionales siguen siendo las mas afectadas debido al fenómeno sísmico, porque generalmente están asentadas sobre suelos susceptibles a fallas, además la construcción se desarrolla sin ningún tipo de diseño, planificación y control y se localiza en sectores históricos, zonas de deterioro urbanístico, zonas de desarrollo progresivo, de consolidación, o invasiones.

Según *CERESIS* (2001) en Sur América cerca de 40 a 50 millones de personas viven en construcciones de adobe en regiones sísmicamente activas y por lo tanto expuestas a terremotos destructivos. En ese sentido, al observar los efectos de los sismos se encuentra que con frecuencia la gran mayoría de muertes se deben al colapso de las edificaciones construidas con materiales y técnicas tradicionales, como el adobe, ladrillo cocido, bahareque y tapia pisada. Situación que se ratifica con la ocurrencia de cada evento sísmico.

La época de construcción, el estado de deterioro, la carencia de mínimas normas constructivas, y terrenos inestables, son algunos de los factores que inciden en la alta vulnerabilidad que han demostrado este tipo de edificaciones. De otro lado, muchas ciudades han visto como lo mejor de su patrimonio arquitectónico ha quedado destruido debido al efecto de los sismos, de manera que se pierden dos valores irrecuperables como son: la vida humana y el patrimonio de un pueblo, es decir los vestigios de su historia.

De manera muy sintética se muestran a continuación, algunos de efectos generados por los terremotos de Cúcuta en 1981, Popayán en 1983 y el del Eje Cafetero en 1999, en edificaciones de construcción tradicional en Colombia.

2.7.1 Sismo de Cúcuta 17 de octubre de 1981

Afectó principalmente los barrios ubicados en la zona céntrica de la ciudad ó casco antiguo. La mayoría a edificaciones afectadas obedecían a construcciones en materiales y técnicas provenientes de la tradición colonial, edificadas en de adobe, además de viviendas en bahareque, así como las de ladrillo pegado con mortero de calicanto.

De acuerdo con *Sarria* (1981), los daños presentados en las viviendas de Cúcuta fueron:

- Desplomes totales o parciales de cubiertas debido al mal estado de la madera por la acción de insectos y por el gran peso de las mismas.
- Agrietamientos severos hasta destrucción de muros.
- Caída de áticos ó parapetos y adornos en fachada.
- Caída de fachadas falsas, construidas sobre muros de adobe y daños en la carpintería. *Sarria* (1981) denomina fachadas falsas, a las fachadas, que han sido adicionadas con posterioridad a la edificación original, como producto de la influencia estilística del Republicano. Esta intervención en la mayoría de los casos se realiza sin amarrar adecuadamente la nueva fachada a los muros existentes y eliminando el alero. Es decir, que la nueva fachada, generalmente en otro material, queda suelta y supremamente vulnerable ante movimientos sísmicos.



Tomado de *Sarria*, 1981.

Figura 48. Efectos del terremoto de Cúcuta en edificaciones populares

2.7.2 Sismo de Popayán del 31 de marzo de 1983.

Este terremoto reiteró lo susceptible que pueden ser las edificaciones de construcción tradicional, de tapia, adobe y techo de barro, además de las construcciones modernas (edificaciones de mampostería no reforzada o no confinada, por lo general construidas antes de la vigencia del primer Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes de 1984). La zona mas afectada en Popayán fue el sector histórico o centro de la ciudad donde se encontraba buena parte su patrimonio arquitectónico, religioso y cultural, constituido por edificaciones construidas en tapia y adobe con teja de barro.

De 1.727 viviendas localizadas en el centro histórico mas de 300 quedaron destruidas, alrededor de 950 semidestruidas y por lo menos unas 440 quedaron averiadas. En total el número de viviendas afectadas en toda la ciudad fue de mas de 13.000, cifra equivalente al 70 % de las existentes (*Ramirez, 1989*).

Según *Espinoza, (1983)* en *INGEOMINAS, (1986)*, las principales causas de falla que ocasionaron graves efectos en las edificaciones de adobe y tapia fueron:

- La falta de continuidad de los muros.
- Adición de muros en otros materiales.
- Cubiertas pesadas, constituidas generalmente por estructuras de madera, con caña brava y teja de barro.
- Falta de arriostramiento entre la cubierta, muros y pilares
- Adiciones de vanos de puertas y ventanas, aumentando el porcentaje de

aberturas originales.

- Mutilación y demolición de muros al interior de la vivienda.
- Mal estado de conservación
- Efectos del comejen sobre los techos y los entrepisos.

El continuo proceso de modificación de las edificaciones, debido a su adecuación para una vivienda mas cómoda y funcional, trajo como consecuencia alteraciones estructurales drásticas. La apertura de puertas, ventanas y huecos para muebles, debilitó los muros. La reparación de la cubierta requirió a veces la adición de nuevas camas de barro para lograr un mejor apoyo de las tejas, así el peso de estas cubiertas también aumentó. Otras modificaciones de cubiertas también alteraron algunos de los amarres que posiblemente colocaron los antiguos constructores para lograr un mejor comportamiento de estas casas (*Ramírez, 1989*).



Castrillón, 1983.

Figura 49. Viviendas de adobe afectadas por el terremoto del 31 de marzo de 1983 en Popayán.

De acuerdo con *INGEOMINAS* (1986), las construcciones de ladrillo cocido sufrieron daños tan graves que la demolición de las mismas fue el paso necesario después del sismo. Este tipo de construcción se desarrolló en forma caótica en Popayán, como en la mayoría de las ciudades del país. Los propietarios de un gran número de pequeños lotes construyeron sus propias viviendas en forma precaria, sin ninguna técnica. Generalmente el único control municipal consistió en la revisión de los planos arquitectónicos, pero nadie se preocupó por exigir algunos requisitos mínimos que permitieran lograr un buen comportamiento sísmico de las viviendas.



Figura 50. Bloques de Pubenza en Popayán.

Prácticamente ninguna casa de ladrillo de Popayán contaba en la época del terremoto con un sistema sismo resistente; no contaban con vigas de amarre, los dinteles a menudo eran casi inexistentes y los capiteles o áticos estaban total o parcialmente sueltos de los muros; las aberturas no tenían refuerzos verticales ni horizontales; frecuentemente los muros eran intrínsecamente débiles y la traba entre ellos no existía, o era deficiente. Además las cubiertas de teja contaban con una estructura defectuosa debido a la falta de arriostramiento entre los elementos resistentes.

2.7.3 Sismo del Eje Cafetero del 25 de enero de 1999.

Tomando como referente los desastres en Colombia, ocasionados por sismos fuertes durante la última década, este es el que ha generado la mayor cantidad de muertes y pérdidas materiales. Sus cifras indican que cerca de 1200 personas perdieron la vida y por lo menos 5000 resultaron heridas. El número de afectados fue del orden de 200 000, los cuales perdieron la vivienda y el espacio de trabajo, causando daños a cerca de 50 000 edificaciones en la zona cafetera, cuyos costos ascienden a US\$ 1800 millones de dólares, generando un impacto total que se estima del orden del 1.5 % del PIB del país (Cardona, 1999).



Figura 51. Colapso de un edificio moderna en Armenia, durante la replica de las 5:40 p.m el 25 de enero de 1999.

Los daños generados por el sismo del Eje Cafetero se concentraron en edificaciones antiguas, en edificios de mampostería no reforzada, faltos de confinamiento y en edificios construidos antes de la expedición del primer código nacional de construcciones sismo resistente (Cardona, 1999).



Figura 52. Colapso de una edificación moderna de construcción popular, terremoto del 25 de enero de 1999 en el Eje Cafetero.

Las edificaciones de uno y dos pisos fueron las que más daños sufrieron, debido fundamentalmente a las características del sismo. En las construcciones situadas sobre rellenos, el daño se extendió hasta las construcciones de seis pisos (Aguar 1999). Muchas de las edificaciones del centro de la ciudad de Armenia y Pereira presentaron daños estructurales severos, debido a la mala calidad de los materiales, al diseño inadecuado y la deficiencia en la construcción (Cardona, 1999),

Por otra parte, las edificaciones tradicionales locales construidas en bahareque "estilo temblorero" presentaron un buen comportamiento. Sin embargo algunas de estas edificaciones colapsaron o perdieron su cubierta debido al alto grado de deterioro que presentaban en el momento del sismo,

al igual que también fallaron por que se les había adicionado muros de mampostería no reforzada al interior o en sus fachadas, que al fallar por la falta de estabilidad, amarre y resistencia indujeron el colapso de la edificación. Estas viviendas en bahareque causaron la menor cantidad de lesionados debido a su bajo peso.



Figura 53. Edificaciones de bahareque “Estilo temblorero” en el Eje Cafetero.

2.8 RIESGO SÍSMICO.

2.8.1 Evaluación riesgo sísmico.

La evaluación del riesgo sísmico consta de las siguientes etapas (tomado de estudios de vulnerabilidad y evaluación de riesgo sísmico, planificación física y urbana en áreas propensas, Cardona, 1988):

- Evaluación de la amenaza sísmica a escala global y local.
- Identificación de los elementos expuestos o amenazados.
- Definición de funciones de vulnerabilidad que relacionen las pérdidas específicas con la amenaza sísmica para los elementos expuestos.

- Evaluación de las pérdidas específicas de cada elemento expuesto, determinando su factor de participación en los bienes existentes.
- Evaluación de la totalidad del riesgo sísmico para una región determinada.

2.8.1.1 Evaluación de la amenaza sísmica.

La amenaza sísmica representa un peligro potencial que puede expresarse como una probabilidad de que la intensidad de un evento no sea excedida durante un periodo de tiempo. Esta amenaza puede determinarse para diferentes periodos de retorno relacionados con la vida útil económica de los elementos sometidos a ella.

De acuerdo con *Cardona*, (1988), la amenaza sísmica se puede expresar en términos de la aceleración pico efectiva, la velocidad, el espectro de respuesta, la duración de excitación, el contenido frecuencial u otros parámetros que pueden afectar las estructuras.

Uno de los parámetros más utilizados es la intensidad, en la Escala Modificada de Mercalli, debido a que con ésta es posible asignar una intensidad a eventos históricos bien documentados e incluirlos en el catálogo de eventos ocurridos. (*Cardona*,1988; *Bommer*, 1986)

2.8.1.2 Identificación de los elementos expuestos.

Una vez conocido el nivel de amenaza sísmica es necesario identificar los elementos expuestos sometidos a riesgo en el área de interés, es decir, la definición de un modelo de pérdidas o efectos para la región en estudio. Las pérdidas pueden ser directas e indirectas. El modelo de pérdidas directas está relacionado con el daño físico, expresado en víctimas, daños en la infraestructura de servicios, en la vivienda, en las empresas, etc.

2.8.1.3 Evaluación del daño y funciones de vulnerabilidad.

Para definir el modelo de pérdidas y efectos sobre una región considerada, es necesario, idealmente, realizar una evaluación del daño causado sobre los elementos expuestos en eventos anteriores. Esta evaluación debe llevarse a cabo utilizando un procedimiento unificado sobre la región, que permita construir una base de datos consistente de los daños, y así realizar una estimación confiable de las pérdidas (*Cardona, 1988*)

Para cada tipo de 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 conocidas como funciones de vulnerabilidad empírica u observada expresan las pérdidas específicas para un rango de amenaza sísmica considerado (*Cardona, 1988; Caicedo, et. al, 1994*).

Las funciones de vulnerabilidad derivadas a raíz de las evaluaciones de daños, se utilizan para la estimación de las pérdidas específicas de los elementos sometidos a riesgo. Estas funciones pueden emplearse como

información básica para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de las estructuras.

Al parecer todavía en Colombia no existe una base de datos consistente de los daños observados en estructuras afectadas por sismos anteriores, lo que dificultaría la construcción de funciones de vulnerabilidad a partir de un inventario de daños. No obstante, es preciso aclarar que esto no es un impedimento para la evaluación y la estimación de daños de estructuras existentes, si bien, en la actualidad se han elaborado estudios en algunas regiones del país referidas a la estimación del riesgo sísmico, para los cuales se han establecido otro tipo de parámetros, que permiten igualmente la estimación del riesgo sísmico a gran escala.

2.8.1.4 Estimación del riesgo sísmico específico.

El riesgo sísmico específico (*UNDRO*, 1979, en *Cardona*, 1988) se define como el nivel de pérdidas específicas probables para un escenario particular de eventos sísmicos. De tal manera que es esencial considerar para los diferentes tipos de edificaciones en sus respectivas categorías (sismo resistente y no-sismo resistente) en una región determinada, los diferentes niveles esperados de amenaza a que se encuentran sometidos durante su vida útil y una probabilidad de no-excedencia justificada desde el punto de vista de la seguridad y el desarrollo económico de la región. Esta forma de evaluar las pérdidas específicas no estima el total de pérdidas en un periodo de tiempo dado, sino el total de pérdidas para un evento sísmico esperado que pueda ocurrir con un periodo de retorno determinado.

2.8.1.5 Estimación del riesgo sísmico total.

El riesgo sísmico total puede determinarse después de conocer el riesgo sísmico específico de cada elemento considerado, obtenido para diferentes periodos de retorno y una probabilidad definida, conocida una densidad, y la distribución espacial, así como la vida útil económica de cada elemento sobre el área de estudio.

Para diferentes niveles específicos de amenaza sísmica puede evaluarse acumulativamente el riesgo sísmico total esperado para la región, de acuerdo con la proporción de cada elemento en el intervalo total de los mismos y de acuerdo con la distribución en el espacio del riesgo sísmico específico. Este puede ser expresado como la pérdida en términos del valor económico directo que representa o como la pérdida en términos de un porcentaje con respecto al volumen total de las propiedades.

A manera de síntesis y de acuerdo con todo lo mencionado anteriormente, se puede decir que es posible, a partir del conocimiento de la vulnerabilidad de elementos expuestos y la amenaza sísmica en una región determinada construir escenarios de vulnerabilidad y riesgo sísmico.

2.8.2 Escenarios de vulnerabilidad sísmica.

Un escenario de vulnerabilidad sísmica se puede definir como el conjunto de condiciones particulares o generales que muestran la susceptibilidad ó predisposición de un grupo de elementos expuestos, a sufrir daño o pérdida debido a un movimiento sísmico, de una intensidad dada, en un periodo tiempo y en un lugar determinado.

De acuerdo con la definición anterior, es posible construir escenarios de vulnerabilidad sísmica, para cada uno de los indicadores de vulnerabilidad, identificando y mostrando las áreas y los elementos más vulnerables de la zona de estudio, permitiendo además de tener una información estadística, conocer una distribución espacial de los elementos susceptibles a daño. Estos escenarios pueden ser representados en mapas, utilizando un sistema de información geográfica - SIG.

2.8.3 Escenarios de daño sísmico.

Un escenario de daño sísmico se puede definir como el conjunto de condiciones particulares o generales que muestran y definen las pérdidas o daños potenciales de los elementos expuestos, que se pueden generar debido a la ocurrencia de un movimiento sísmico, de una intensidad dada, en un periodo de tiempo y en un lugar determinado. El escenario de daño sísmico permite conocer, aparte de una información estadística, una distribución espacial de los daños probables. Estos escenarios pueden ser representados en mapas, utilizando un sistema de información geográfica - SIG.

2.8.4 Construcción de escenarios de vulnerabilidad y daño sísmico mediante la utilización de un *sistema de información geográfico* – SIG.

De acuerdo con lo arriba mencionado se puede concluir que un escenario es generalmente una sinopsis o un esquema de lo que podría suceder; así un escenario de daños puede ser considerado como una sinopsis o un esquema de un evento peligroso, y de sus impactos sobre una región o comunidad.

Los mapas son una herramienta valiosa para localizar y conocer los elementos en riesgo dentro una comunidad. Estos pueden proporcionar información, sobre cuales de las áreas requieren mas estudio; cuales requieren medidas de mitigación y cuales necesitan inmediata atención frente a la ocurrencia de un evento peligroso.

Para la mapificación de los escenarios de vulnerabilidad y daño sísmico es necesario tener una base datos consistente de información, sobre los elementos en estudio de acuerdo al nivel de detalle requerido y a la escala en que se esta trabajando. Además de un mapa base y un Sistema de información geográfico **SIG**, que permita combinar o integrar la información para su representación grafica espacial.

Se puede decir que un **SIG** combina utilidades básicas de un sistema gráfico con la potencia y capacidad de una base de datos relacional, compartiendo información de estos dos sistemas de forma transparente para el usuario (ESRI, 1990, en Caicedo et al, 1994).

De acuerdo con *Caicedo et., al* (1994), la principal diferencia de los **SIG** con otro tipo de software para la representación gráfica de información, consiste básicamente en que estos mantienen una relación espacial de los objetos almacenados en la memoria del computador y permiten la asignación a dichos objetos de cualquier información que sea posible almacenar en una base de datos. Esta información hace posible que los objetos no solo puedan ser relacionados entre sí de forma gráfica sino también mediante operaciones lógicas, matemáticas o complejas.

3. DESARROLLO URBANÍSTICO DE CALI Y SUS IMPLICACIONES EN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LAS EDIFICACIONES.

3.1 GENERALIDADES.

La llegada de los españoles a América introdujo una serie de transformaciones referidas al uso de los materiales y técnicas para la construcción de viviendas. Posteriormente las ciudades que se conformaron fueron influenciadas en diversas épocas por tendencias arquitectónicas que cambiaron su fisonomía. El crecimiento demográfico, la necesidad de soluciones habitacionales, el desplazamiento campesino hacia las ciudades y los desarrollos urbanísticos (formales e informales) contribuyeron también a la transformación de los espacios físicos.

La evolución de la vulnerabilidad sísmica de la construcción popular, ha sido y sigue siendo un proceso dinámico en el tiempo, que depende no solamente de factores técnicos sino también de la interacción de factores culturales, sociales, ambientales, políticos, económicos, en una región determinada. Estos han generado la construcción de viviendas en zonas no aptas, edificadas con deficientes técnicas y materiales de baja calidad. Por el contrario muchas de las edificaciones en zonas aparentemente seguras, han sufrido procesos agudos de deterioro, como en el caso de los "Centros Históricos".

Para reconstruir una imagen coherente de la evolución histórica de la vivienda en Cali, es necesario reproducir la génesis y etapas generales de este proceso, con base en los vestigios físicos y documentales históricos de la arquitectura y del desarrollo urbano de las ciudades colombianas. Se trata, por lo tanto de la construcción histórica de hipótesis explicativas, que permitan encontrar el origen de la vulnerabilidad sísmica de las tipologías constructivas existentes en el territorio nacional y específicamente en barrio San Antonio de Cali. Esta síntesis histórica de la evolución de las viviendas, puede suministrar información referente a las técnicas de construcción, materiales, comportamiento frente a la amenaza sísmica y su transformación, con el fin de identificar las tipologías más vulnerables, que puedan representar hoy en día riesgo para la población.

A continuación se esboza, de una manera muy general la evolución de la vivienda en la ciudad de Cali, enmarcada en el contexto colombiano a partir de la época pre-hispánica, pasando por el periodo Colonial, Republicano hasta la época moderna y se analiza de una forma sintética la vulnerabilidad asociada a cada tipología constructiva.

3.2 PERIODO PRE-HISPÁNICO

Según Morales y Castro (1975), no se tiene evidencia que en el territorio nacional se hallan desarrollado manifestaciones importantes en el campo de la construcción y en el uso de materiales por las culturas precolombinas, a diferencia de lo ocurrido en otros lugares del continente Americano.

La construcción precolombina se caracterizó por la utilización de materiales de origen vegetal como madera y paja. Estas viviendas, sirvieron de albergue para los primeros conquistadores. Su construcción era rápida y no requerían de mano de obra calificada, además, su costo era muy bajo debido a que por lo general las fuentes de materiales no se hallaban lejos, y por ser livianos se facilitaba su transporte y colocación (*Morales & Castro, 1975*). El uso de materiales duros y permanentes como el adobe y la teja de barro, era desconocido por los indígenas (*Rueda, 1975*).

Los tipos arquitectónicos más representativos de las culturas indígenas pre-hispanicas en Colombia son los de planteamiento central y rectangular. Los cronistas españoles los reconocieron como bohío o caney, debido a que también habían sido tipos básicos de la arquitectura indígena Ibérica Pre-Romana, y de la cultura neolítica europea (*Cruz, 1988*).



Figura 54. Esquema en planta y en altura de un bohío.

Según Cieza de León (en *Aprile*, 1991), los poblados indígenas localizados en la ciudad de Cali, estaban conformados por grupos de 10 o 15 viviendas. Cieza en uno de sus escritos describe las características de las edificaciones nativas así:

"... Sus casas son grandes y redondas, hechas de grandes varas y vigas, que empiezan desde abajo y suben arriba hasta que hecho en lo alto de la casa un pequeño arco redondo, femece el enmanderamiento; la cobertura es de paja. dentro de estas casas hay muchos apartados entoldados con esteras: tiene muchos moradores ..."

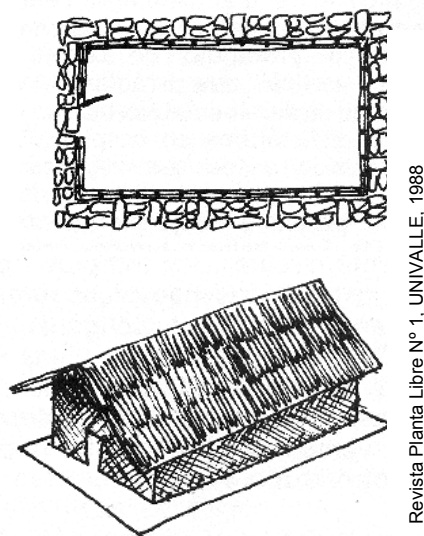


Figura 55. Esquema en planta y en altura de un Caney

Se tiene referencia que algunas viviendas indígenas de paja y madera sufrieron daño por un terremoto en 1530. Ramírez (1975), en "Historia de los Terremotos en Colombia" referencia este terremoto que al parecer afectó

toda la costa norte de Sur América, con epicentro frente a las costas de Venezuela, en uno de sus apartes, tomado de Historia de las indias, Fray Bartolome de las Casas, (1591, T. III, pp. 405), dice:

"...Cayeronse muchas casas de los indios, que son de paja y madera, por lo cual murieron algunos indios, justamente por el terror y espanto que hubieron".

Las técnicas constructivas de los indígenas, con muy contadas excepciones en Colombia, no pasaron del simple entramado de cañas y techumbres de hojas de palma o de paja, que aunque fueron de gran utilidad para los fundadores de ciudades en sus primeros desarrollos urbanos, carecían de condiciones fundamentales para las costumbres occidentales que trasladaron desde España. El bahareque de origen indígena, es el aporte a la arquitectura de la colonia (*Rueda & Gil, 1975*).

En síntesis el sistema constructivo utilizado por los indígenas en este periodo se caracteriza por la utilización de materiales livianos para la construcción de viviendas, como la guadua, la paja o palma y el barro. De otro lado, la geometría de las edificaciones era muy regular en planta como en altura, de formas circulares y rectangulares, lo que habría garantizado el comportamiento adecuado de la mayoría de estas viviendas frente al fenómeno sísmico, aunque muchas de ellas se vieron afectadas por otro tipo de amenazas, como la de los incendios y ataques españoles. Por estar construidas con materiales de origen orgánico, este tipo de viviendas eran de poca durabilidad.

3.3 PERIODO COLONIAL.

Al parecer los conquistadores del territorio colombiano no encontraron ningún asentamiento que presentara condiciones ideales, que permitieran el desarrollo de una nueva población basada en el núcleo urbano ya existente. Las fundaciones, aunque en varias ocasiones se llevaron a cabo en el mismo lugar en que se hallaban las poblaciones indígenas, no tomaron de estas ningún elemento para su futuro crecimiento. Si se decidía establecer allí una nueva ciudad, se hacía por las razones de comodidad que representaba situarse en un lugar ya poblado y no por las ventajas que podría ofrecer un orden espacial y urbano ya establecido (*Rueda, 1975*).

En 1550 todos los españoles vivían en sus fundaciones urbanas, construidas en bahareque, maderas blandas, bejucos, caña barava con techos de paja. (*Aprile, 1991*). Según algunos historiadores las edificaciones construidas con estos materiales, eran estructuras débiles, de poca durabilidad frente a la acción del clima, susceptibles a los incendios y al ataque de las tribus indígenas y de corsarios europeos. La simple construcción de los bohíos y sus elementos no podían ofrecer en ningún momento perdurabilidad, seguridad y, especialmente, condiciones de adaptabilidad para edificaciones de cierta envergadura (*Rueda & Gil, 1975*).

Caseríos enteros ocupados por los conquistadores fueron destruidos al incendiarse en múltiples ocasiones, lo que obligó la construcción de nuevas edificaciones con técnicas importadas. Con el tiempo el nuevo sistema

constructivo fue desplazando al tradicional. Los conquistadores importaron desde Europa, las técnicas de construcción para edificar sus viviendas (formas y manera de elaborarlas); estos utilizaron ciertos tipos de materiales de la región y una numerosa mano de obra indígena, que debió ser entrenada para tal propósito, empleado una serie de materiales y elementos aunque conocidos por los indígenas, no eran utilizados en la construcción de las viviendas nativas (*Morales, Castro, 1975*).

Las "Leyes de Indias", contemplaban normas precisas sobre la disposición física de las ciudades a ser fundadas por los conquistadores españoles en el nuevo mundo. Las calles debían conformar retículas regulares, entre las cuales se establecían las manzanas con determinadas dimensiones, construidas con cierto número de solares. Esta retícula giraba en torno de una plaza mayor geométricamente reglada, alrededor de la cual se construían locales públicos (*Vásquez, 1982*).



Historia del arte Colombiano, 1975.

Figura 56. Viviendas coloniales Municipio de Villa de Leiva.

Durante las primeras años de la conquista cada manzana era conformada por cuatro chozas bajas y pajizas indicando las cuatro esquinas. El diseño de la cuadra se precisa cuando se unen estos ranchos por medio de un largo muro, primero de guaduas y después de tapias. Así se va esbozando la perspectiva producida por la continuidad del paramento cuando a la primera construcción se agregan, y adosadas a ellas y sobre los costados, las prolongaciones de los aposentos (*Aprile, 1991*).

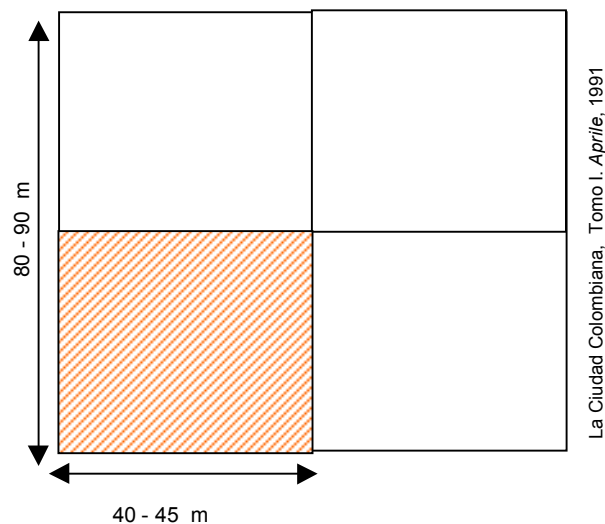


Figura 57. Morfología predial de la época de la conquista.

Durante el periodo comprendido entre el Siglo XVI y XVIII, las edificaciones que conformaban las ciudades colombianas de tradición colonial, fueron afectadas por innumerables sismos, que ocasionaron por lo general, la caída de muchas iglesias y de centenares de viviendas, que posteriormente fueron reconstruidas.

Al respecto *Espinoza* (1985) dice: “...Cabe anotar que el proceso mediante el cual se desarrolló la construcción en el nuevo reino, fue desordenada y a veces vertiginosa repetición del ejercicio de aproximaciones sucesivas, llevado acabo en el viejo mundo desde el principio de los siglos. Este hizo que lejos de ser el de aquí una sucesión de “ensayo” y “error” cuidadosamente verificado, fue mas bien un “error y ensayo” caóticamente rectificado. Nunca llegaron al nuevo mundo suficientes artífices del viejo para adiestrar a los aventureros españoles y a los aborígenes americanos en el arte de la construcción. Es así como las setenta mil iglesias construidas en América española durante solo tres siglos, adolecieron de defectos, que en muchos casos las echaron por tierra aun antes de su inauguración...”

Según el *Arboleda* (1935) en *Calero* (1983) , la ciudad de Cali en el siglo XVII se extendía desde el pie del Cerro de San Antonio; por el norte hasta el rio Cali, que en ese entonces corria en su curso original, por la parte opuesta daba al “Monte del Calvario” y a la colina de la “Mano del Negro” (San Cayetano), dejando mas al centro el angosto caserío que después se extendió con la construcción de las iglesias de San Francisco, Santa Rosa y el antiguo templo de San Nicolás.

La forma de construcción española que se introdujo a partir de la conquista, al parecer no se había generado bajo una concepción de resistencia sísmica, debido a que provenía y se había desarrollado en una región donde estos fenómenos tienen poca probabilidad de ocurrencia. (*Maskrey & Romero*, 1986). Las construcciones coloniales se vieron afectadas en innumerables

ocasiones por sismos, algunos destructores, que obligaron a los constructores de la época a reconstruir lo perdido, haciéndolo más recio y más pesado (Rueda & Gil, 1975).

En el siglo XVII las construcciones originadas en la tradición nativa siguieron dominando, estas se combinaron con aportes introducidos por los españoles; asociando, por ejemplo, el uso de los techos de paja con el bahareque sobre cimientos de piedra.



Historia del Arte en Colombiano, 1975

Figura 58. Vivienda construida en bahareque y techo de paja

Según Arboleda (1935), en Calero (1983) “... *En los primitivos tiempos de Cali, predominaban en ella las casas de paja, que hasta el paso siglo y medio de fundación se destacaba la plaza; luego se alejaron un poco, pero formaban la mayoría. Más tarde, al concluir el dominio español las había hasta media cuadra de la plaza principal. Retirándose del centro iban disminuyendo las habitaciones de tapia, en segunda las de adobe y las de bahareque y extramuros se observaban alternadas las construcciones de teja, de diversidad de paredes, con las de techo de paja o canales de guadua...*”



Figura 59. Vivienda típica caleña con cubierta constituida por guaduas, en el barrio San Nicolás a finales del siglo XIX

El proceso de evangelización trajo como consecuencia la construcción de iglesias y capillas en el nuevo reino, en materiales locales, frágiles y perecederos, que no tardaron en sufrir las consecuencias de los movimientos telúricos (*Rueda*, 1975). La mayoría de iglesias y capillas construidas a lo largo de la historia de Colombia, sufrieron las consecuencias de los sismos en diversas ocasiones.

Las construcciones de casas e iglesias en Colombia tuvieron un carácter improvisado, de estructura pajiza. Solo en el siglo XVII fueron reemplazadas por construcciones en tapia o mampostería y techos de teja de barro. Al parecer la iglesia de San Pedro, en Cali, tuvo cimientos de silleria (piedra) y mampostería, y el arco toral en ladrillo, ya en el siglo XVI debió ser la más importante de todas las construcciones de esta época. La iglesia de La Merced, que data de 1541, fue de estructura pajiza (*Sebastian*, 1965).

En el siglo XVIII una moderada demanda auspicia algunos cambios tecnológicos en la construcción y el paso progresivo al adobe o al ladrillo crudo, la tapia y la teja de barro (*Aprile*, 1991). Este salto técnico permitió otro salto en altura: uso mixto del edificio, el cual adquiere la doble función comercial, en la planta baja y residencial en la planta alta.

El uso de la piedra se limitó a las obras de ingeniería militar (Santa Marta y Cartagena) y la ornamentación de algunas portadas o fachadas de los principales templos, en las ciudades más prosperas. En esta época también se introduce, aunque tímidamente, el ladrillo cocido, material muy costoso para la época, usado por lo general para la construcción de obras suntuarias o edificios religiosos. (*Aprile*, 1991).

En 1766 ocurrió un evento muy fuerte que ocasionó daños en varios de los templos religiosos y viviendas, afectando a Cali y Buga. En Cali las iglesias mas afectadas, fueron La Merced, Santo Domingo, San Agustín, San Francisco, La Ermita y muchas viviendas bajas (tomado de *Rosales*, 2001).

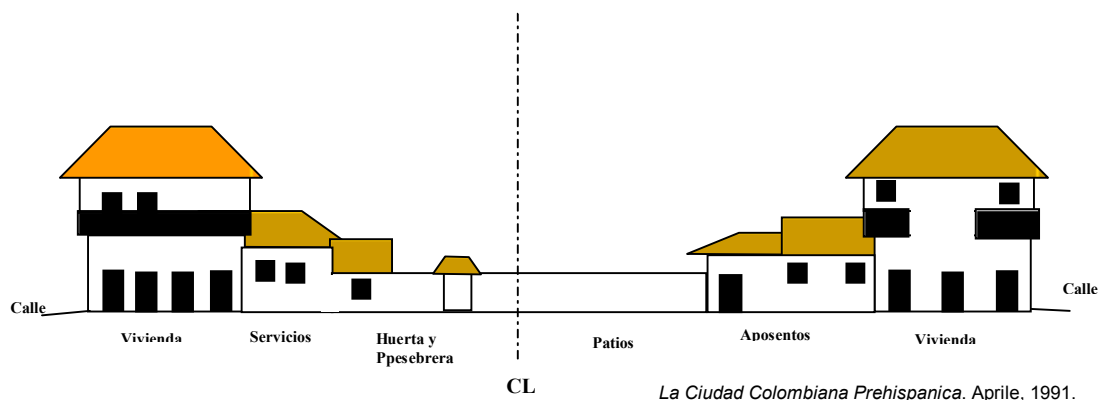
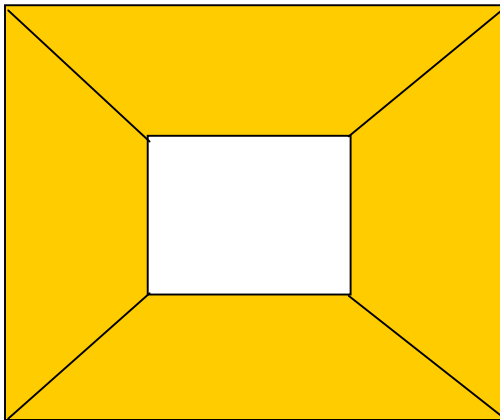


Figura 60. Perfil de una calle del siglo XVIII.

La arquitectura introducida por los españoles en esta época se caracteriza por la construcción de edificaciones de tipo claustro sobre planta cuadrada, con patio interior (tipo convento). La casa colonial, como generalmente se denomina, independientemente de la fecha en que fue construida, es una adaptación del modelo peninsular a las condiciones locales. Su esquema es básicamente introvertido, muy cerrado hacia el exterior y que concentra toda su atención en un espacio abierto central: el patio. La vivienda gira a su alrededor como determinante primordial en el diseño, a él dan todas las habitaciones, salones y demás dependencias, el porcentaje de vanos de puertas y ventanas es reducido (*Rueda & Gil, 1975*)



Planta típica de una vivienda colonial



Historia del Arte Colombiano, 1975

Patio Central de una vivienda colonial

Figura 61. Características de una vivienda colonial

Al cambiar de propietario estas construcciones fueron por lo general divididas. Así se empieza un fraccionamiento de la estructura original de la manzana, generando predios rectangulares muy alargados.

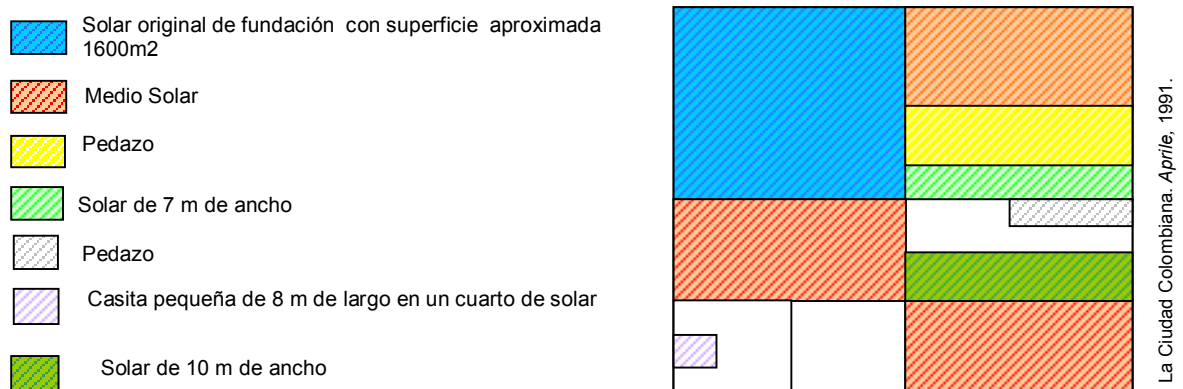


Figura 62. Desintegración del latifundio urbano y paso del solar al lote (1719 –1752).

Por ejemplo, en Cali en el año de 1808, existían 1.151 viviendas, 153 casas de dos plantas (13 %) y 998 de una sola planta (87 %). De estas 669 eran de adobe y techo de teja de barro (58 %), 482 en bahareque con techo de paja (42 %) Aprile (1991), citando el informe Vergara de 1808. Los modelos de viviendas de esa época eran clasificados en los siguientes tipos:

Modelo I

Tipo I

- Bahareque y techo de paja.

Tipo 2

- Bahareque y teja de barro.

Modelo II

Tipo I

- Adobe y techo en teja de barro de un piso.

Tipo 2

- Adobe y teja de barro de dos pisos.

Tanto los incendios como las ordenanzas de los cabildos promovieron la sustitución paulatina del techo de paja por el de teja. Sin embargo, al finalizar la ocupación española los censos muestran aún, en muchas ciudades, una mayoría de casas techadas con paja: es una clara manifestación construida del peso demográfico de los estratos populares y de su pobreza (Aprile, 1991). De acuerdo con Calero, (1983) *“...la independencia llegó cuando la ciudad tenía una gran mayoría de chozas de techo pajizo. Y después para Cali vino la Patria Boba y el letargo durante casi un siglo, pues solamente en los últimos cinco años del siglo XIX y en los primeros veinte años del siglo XX, se realizaron construcciones más sólidas...”*



Figura 63. Popayán a finales del siglo XIX y principios del XX.

Todo lo anterior caracterizó la arquitectura colonial en Colombia, desde el siglo XVII hasta finales del XVIII. En este periodo se introdujeron materiales traídos de España y desconocidos completamente en América y es así como a los pocos años de iniciada la conquista, aparecen en las principales poblaciones las primeras casas de teja de barro o "española", que reemplazó la cubierta de paja empleada por los indígenas. Los muros de bahareque, mezcla de caña y arcilla, desaparecen para dar paso al trabajo de sillería (muros de piedra), muros de adobe o ladrillo y la introducción de espacios ajenos a la cultura aborígen, cambiando la fisonomía urbana de los núcleos de población (*Morales & Castro, 1975*).

El espacio urbano característico de la ciudad de Cali, por ejemplo, no sufrió cambios en el periodo comprendido entre los siglos XVIII y XIX, la mayoría de sus viviendas eran de una planta con un patio central y pesebreras. Los sistemas constructivos y los materiales utilizados siguieron siendo los mismos, a pesar de haber perdido los nexos con España, debido a la independencia. La tradición creada en los siglos anteriores estaba tan asentada que el diseño urbano y las construcciones conservaban las mismas características.

A manera de síntesis, la llegada de los españoles marca el primer contacto con las manifestaciones de la arquitectura indígena, ocasionando cambios significativos en lo que se refiere a la construcción tradicional en la época de la conquista. Se puede decir que el cambio de materiales livianos (bahareque, paja) para la construcción de vivienda, a materiales pesados

(muros de adobe, tapia y teja de barro), el salto en altura de las viviendas, de uno a dos pisos (viviendas mas pesadas), la transformación predial de las manzanas (loteo, fraccionamiento), y el cambio de uso, son elementos que incidieron en la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas en este periodo, viéndose afectadas en diversas épocas por los movimientos telúricos.

En el barrio San Antonio las edificaciones de estilo colonial están conformadas por la Capilla localizada en la Colina, que data de 1747, y algunas viviendas construidas en adobe y bahareque.



Figura 64. Vivienda de tradición colonial en la zona de estudio.

3.4 PERIODO REPUBLICANO

La arquitectura propia de la colonia se interrumpió bruscamente al consolidarse la República, cuando se trajeron al país diseños y sistemas constructivos del viejo mundo especialmente para edificios estatales (Lago, 1998). La ruptura de los lazos con España a mediados del siglo XIX y

la transformación de la vida social, introduce cambios notorios en la arquitectura debido a que se importa desde Europa (Francia e Italia), el estilo arquitectónico Neoclásico. La traza de la ciudad colonial y los tipos constructivos se mantienen en esa época, pero se establecen nuevos patrones estéticos: hay un énfasis en la verticalidad y tamaño de los vanos, cubiertas menos inclinadas y pisos altos. En la segunda mitad del siglo XIX ocurre un proceso de densificación de la ciudad debido a la sub-división de los solares y aumento de las construcciones de dos pisos. *Barney*, (1991), en *Campos* (1992).

Este estilo denominado Republicano o Neoclásico aparece en Colombia a finales del siglo XIX, se consolida entre 1925 - 1930 y se caracteriza por el retorno a las formas griegas y romanas, basadas en la más estricta simetría de los elementos rítmicos en las fachadas y una excesiva exuberancia ornamental. Este estilo introduce elementos como mansardas y buhardillas, balcones con antepecho o balaustradas, lo mismo que una variada gama de capiteles, columnas, cornisas decoradas, frisos y dentrículos, pilastras, pórticos y frontones, entre otros (*Mosquera & Aprile*, 1984). Esta arquitectura, corresponde a un momento histórico, donde aparecen los usos institucionales; en este estilo aparecen expresiones del neoclasicismo y neogotismo, forma parte de un periodo de transición.

Hasta principios del siglo XIX la ciudad de Cali, creció con el mismo diseño tradicional de la colonia y solo en la segunda mitad del siglo XIX, comenzó a sentirse la influencia de la arquitectura europea, de países como Francia e Italia, en el diseño de las edificaciones caleñas, que por lo general se limitó a

las fachadas, puesto que el diseño interior de la edificación y sus técnicas constructivas, eran casi tradicionales (*Giraldo*, 1992). Esta arquitectura, se incorporó en primera instancia, a barrios como La Merced, San Pedro y el Vallano (hoy San Nicolás).

Las primera edificaciones que obedecen a esta arquitectura Republicana en la ciudad de Cali, aparecen entre 1915 y 1925, con el Teatro Municipal y con el edificio comercial de Emiliano Otero (*Mosquera & Aprile*, 1984), esta última es la primera edificación en hormigón armado en la ciudad (*POT de Cali*, 2000). Entre 1926 y 1930 se construye el Palacio Nacional y el edificio de la Gobernación, el cual fue demolido posteriormente. Todas estas edificaciones alcanzan una altura ente 3 y 4 pisos. A medida que se aleja de la Plaza Caicedo hacia los barrios adyacentes, según *Mosquera & Aprile* (1984), las especificaciones de este tipo de arquitectura disminuyen rápidamente, pero no la exuberancia decorativa.

La introducción del estilo republicano en la construcción de edificaciones en Colombia, presenta una trayectoria temporal y un crecimiento de mestizaje estilístico, a medida que este se iba difundiendo, entre las clases sociales, fue perdiendo poco a poco los rasgos del estilo original, hasta popularizarse. Se puede decir que la arquitectura republicana es el traslado de la arquitectura del siglo XIX europeo al medio colombiano (*Mosquera & Aprile*, 1984).

La arquitectura republicana permitió su reproductibilidad; con más o menos habilidad, arquitectos menores o maestros de obra armados de un repertorio fácil de imitar, podrían vestir de "lenguaje republicano" a la arquitectura. La repetición seriada de moldes de yeso para ciertos detalles (capiteles, cornisas por ejemplo) hicieron accesible este lenguaje a la mayor parte de la población (Arango, 1989).

Las viviendas republicanas populares son por general de un piso con alturas que varían entre 4 m y 6 m, sus muros son de adobe, aparecen ritmos de ventanas y puertas en fachadas, las dimensiones de los vanos de ventanas y puertas varían hasta 3 m; sus fachadas presentan elementos decorativos en vanos, como cornisas y molduras; tienen patio central al interior enmarcados por pilares de madera en los cuales se soporta la cubierta. La estructura de la cubierta, de teja de barro, está simplemente apoyada sobre los muros.



Figura 65. Edificación de estilo republicano en la zona de estudio.

Las edificaciones republicanas por lo general están construidas en materiales pesados (adobe, estructuras de cubiertas de madera teja de barro). La configuración en planta es muy alargada y presenta irregularidades, el porcentaje de aberturas en muros es bastante amplio debido al tamaño de sus vanos, en cuanto a la parte estructural, estas edificaciones no presentan ningún tipo de reforzamiento como vigas o columnas, debido a que materiales como el Acero y el concreto no eran de uso popular en la época que fueron construidas. Los muros actúan como elementos estructurales, siendo de gran espesor, debido tal vez, a su esbeltez.

3.5 PERIODO DE TRANSICIÓN.

Este periodo se caracteriza por un mestizaje de estilos o la presencia de una “Arquitectura Ecléctica” que marca la transición hacia el modernismo y el postmodernismo; recoge diferentes elementos de composición y decorativos y los conjuga bajo criterios de romper con las tipologías anteriores. Por definición responde a una manifestación de diferentes formas, estilos, característicos de una arquitectura vernácula, popular, que incorpora nuevos materiales y acabados (*SMP*, 1998).

Las viviendas por lo general son de dos pisos, con muros en ladrillo que actúan como elementos portantes o muros de carga, cubierta en teja de barro, se suprime el alero; aparecen formas, elementos decorativos, como cornisas, vanos con formas geométricas; se eliminan los patios estilo republicano, corredores y pilares; no existen ritmos, ni composiciones simétricas en fachada. Las estructuras de cubiertas y entrepisos están

compuestos de madera que se inserta en los muros (SMP, 1998).

Las viviendas populares de este periodo de transición ganan altura, por lo que las hace mas pesadas. Los muros de ladrillo tienen menor dimensión en comparación de los de adobe. El reemplazo del alero por el ático introduce un riesgo para la seguridad de los ocupantes de este tipo de edificaciones debido a que por lo general, esta continuación de la fachada hacia arriba no se encuentra debidamente arriostrada y puede sufrir falla por desprendimiento.



Figura 66. Edificación ecléctica en la zona de estudio.

3.6 PERIODO MODERNO-CONTEMPORÁNEO.

"El ornamento, esfuerzo de trabajo desperdiciado y por ello salud desperdiciada, así fue siempre; hoy significa además material desperdiciado y ambas cosas significan capital desperdiciado" (Adolf Loos).

Esta frase del arquitecto Adolf Loos, ilustra uno de los pensamientos que rigió el desarrollo de la arquitectura moderna, donde la ornamentación era considerada sinónimo de la arquitectura ecléctica del siglo XVIII y XIX y, por lo tanto, debía romperse con ese vínculo con el pasado, desterrándolo de la nueva estética planteada por la arquitectura moderna.

Según Tascón (1995), en las décadas de 1930 y 1940, se impulsó la modernización del país por los gobiernos de López Pumarejo, presentándose un terreno propicio para nuevas formas de vida social y urbana. A mediados del siglo XX aparecieron las viviendas de arquitectura moderna; influenciada por la proliferación de nuevos materiales, tecnologías y estilos. El ambiente que se vivía en el país era propicio para adoptar la arquitectura moderna como una forma de mejorar las condiciones de vida en las ciudades. Existía una confianza en que la tecnología y los nuevos materiales traerían consigo la solución a problemas como el hacinamiento y la suciedad.

Por esta misma época se consolidó en Cali la industria azucarera, generando barrios residenciales por fuera del casco urbano tradicional. Se construyen entonces, los primeros edificios de ladrillo hueco, completándose así el ciclo estructural de columnas, vigas y entrepisos en concreto armado, esta innovación fue altamente significativa, ya que permitió construir edificios de 12 pisos aproximadamente (*Campos, 1992*).

La arquitectura moderna trajo consigo nuevas formas, exentas de ornamentación, donde se buscaba romper con la simetría clásica. Se buscaba seguir los postulados de Le Corbusier (uno de los pioneros de la

arquitectura moderna), los cuales consistían en: planta libre, fachada libre, estructura independiente. Se incorporaron nuevos materiales como el hormigón armado, lo que permitió un amplio desarrollo estructural, y a su vez estético-arquitectónico, debido a las múltiples posibilidades que este material tiene. En este periodo se ve reducido ostensiblemente el área de los predios, reduciendo los espacios al interior de la vivienda. (*Tascón*, 1995).

En la zona de estudio, así como en otras partes de la ciudad, a raíz de las influencias estilísticas que trajo consigo la arquitectura moderna, fue usual observar como se le cambió la “imagen” a las viviendas consolidadas, fue entonces, cuando ocurrió una transformación de la edificación, al nivel de fachadas, cubiertas y aleros. Se presentaron demoliciones, retrocesos, se cerraron vanos, cambian acabados, materiales y texturas en las fachadas. En algunas viviendas, apareció el garaje, el sótano y semisótano como un elemento importante en fachada. No obstante, aunque la vivienda era transformada, conservaba su estructura original. De otro lado, con frecuencia se observaba el cambio de usos, eliminándose en algunos casos el residencial (*SMP*, 1998).

La altura de las viviendas modernas en la ciudad de Cali, oscila principalmente entre uno y dos pisos. Estas viviendas se construyen generalmente con ladrillo, concreto, estructuras o carpintería metálica. Los acabados se realizan en yeso, cemento, arcillas y sintéticos, también se utilizan diversidad de enchapes.

Volumétricamente aparecieron terrazas, retrocesos, voladizos y los balcones son de mayor tamaño; los vanos en ventanas también fueron mayores; generalmente se suprimieron los aleros, la cubierta además de la teja de barro, se construyó con otros materiales como el asbesto-cemento, acrílicos, sintéticos, plásticos y en losas de concreto (*SMP*, 1998)

La mayoría de edificaciones modernas populares en la ciudad de Cali se han construido por etapas y, por lo general, las edificaciones de este estilo que se construyeron antes de la vigencia de primer Código Nacional de Construcción y Diseño Sismo Resistente CCCSR-84, no presentan elementos como vigas y columnas que les generen mayor ductilidad, lo que las hace muy susceptibles a los movimientos sísmicos. Este hecho ha sido evidenciado en los sismos de Popayán el 31 de Marzo de 1983 y el del 25 de Enero de 1999 en la región del eje cafetero, entre otros. El área de los predios y el grosor de los muros de edificaciones modernas es más reducida en comparación con las dimensiones de los predios y muros coloniales y republicanos.



Figura 67. Edificación moderna en el barrio San Antonio.

A manera de conclusión se puede decir que en el barrio se presenta una mezcla de diversas herencias, entre ellas la indígena (con algunos ejemplos en San Antonio), además de edificaciones que representan algunos de los estilos arquitectónicos presentes en el desarrollo arquitectónico de la ciudad de Cali.

Dentro de la arquitectura popular y en casi todas las regiones de Colombia se conserva en alguna forma el legado indígena, tanto en el tipo de materiales, como en la forma de utilizarlos. El bahareque, mezcla de madera y barro, las cubiertas vegetales y el sistema básico de las estructuras que las soportaban tuvieron su origen definitivamente en la cultura indígena y su uso se ha prolongado por mas de 500 años, tipologías constructivas que han presentado un buen comportamiento sísmico, cuando estas no han sufrido intervenciones (adición de muros en otros materiales) y presentan un buen estado de conservación.

En la ciudad de Cali son ya muy pocas las edificaciones que responden a este tipo de tecnología, debido a que muchas de estas edificaciones fueron demolidas, algunas por su alto estado de deterioro y otras para dar paso a una nueva edificación, y las existentes están por lo general deterioradas. Cabe resaltar que estas edificaciones, son muy diferentes a las del Eje Cafetero en cuanto a su altura y tamaño. Algunos ejemplos se localizan en el barrio San Antonio, estas son viviendas relativamente bajas, con muy pocos vanos en su fachada y con cubiertas de zinc y teja de barro, las pocas edificaciones que existen han sufrido procesos de intervención.

Hasta los años 30, aproximadamente, materiales como el adobe,

constituyeron la materia prima para la construcción de las edificaciones que conformaron al Cali antiguo, dándole paso con posterioridad al ladrillo cocido, muy utilizado para la construcción de vivienda en los sectores populares.

4. EL CONTEXTO DEL BARRIO SAN ANTONIO

4.1 GENERALIDADES

San Antonio, es uno de los barrios más antiguos y tradicionales de la ciudad de Cali. En el se conservan diversas manifestaciones arquitectónicas de carácter histórico - patrimonial, además, es uno de los pocos que presenta vestigios de la arquitectura de tradición colonial y estilo republicano, representados, respectivamente, en su capilla construida en 1747 y una muestra importante de viviendas republicanas de finales del siglo XIX y comienzos del XX, construidas en adobe y teja de barro, de incalculable valor arquitectónico, histórico y documental (*Quintero & Barandica*, 1984). No obstante, siendo un barrio de tanto valor, no ha escapado a los procesos de deterioro que sufren los centros históricos y muchas de sus viviendas han sido transformadas, lo cual, en parte ha ocasionado su deterioro urbanístico.



Figura 68. Panorámica del barrio San Antonio 1999.

4.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

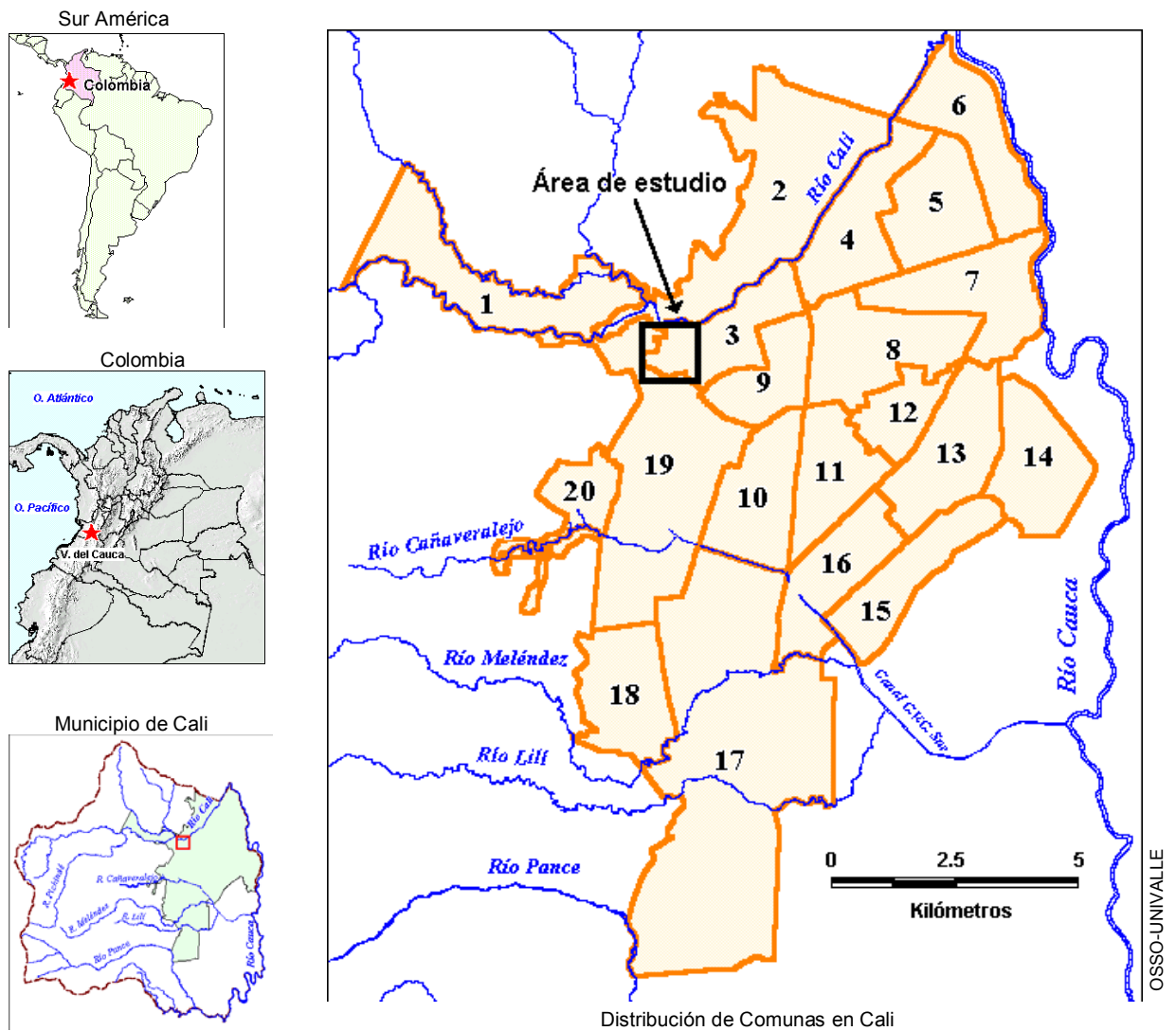


Figura 69. Localización del barrio.

4.3 DELIMITACIÓN Y CRECIMIENTO HISTÓRICO

4.3.1 Delimitación.

El perímetro urbano del barrio va desde la Carrera 4^{ta} hasta la Carrera 12, y desde la Calle 5^{ta} hasta la colina del San Antonio donde se localiza la capilla del mismo nombre. Abarca un total de 27 manzanas. Fijan sus límites la calle 5^{ta} y La Merced; al oriente, el Parque del Acueducto y Los Cristales; al occidente, los barrios Bellavista, Nacional y San Cayetano al sur; por el norte, se destaca la casa de infancia del poeta Jorge Isaacs y la manzana donde anteriormente estuvo el Colegio El Amparo, hoy Hotel Intercontinental y el barrio El Peñón (SMP, 1998).

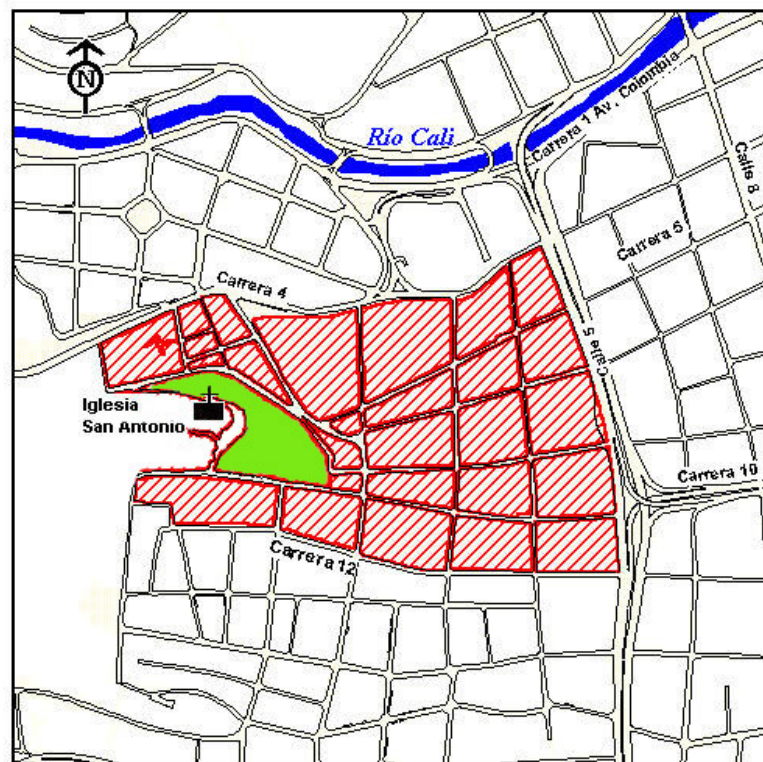


Figura 70. Delimitación barrio.

4.3.2 Crecimiento histórico y urbanístico

El desarrollo histórico y urbanístico del barrio San Antonio se enmarca dentro del desarrollo urbano de la ciudad de Cali, como fiel testigo de su evolución y transformación. Este barrio aún conserva los vestigios de una arquitectura popular de principios del siglo XX, además de la presencia de diversos estilos arquitectónicos y tipos de construcción que hacen evidente una clara transformación de las formas y técnicas de construcción popular, a lo largo de los años.

4.3.2.1 Siglo XVI.

Con base en las investigaciones de Jacques Aprile Gniset (*Aprile*, 1991), expuestas en su libro: "*La Ciudad Colombiana Prehispánica de Conquista Indiana*," la conformación del escenario físico de la ciudad de Cali se realizó de la siguiente manera:

En el año de 1537 el Capitán Miguel Muñoz fundó la ciudad de Cali, por orden de Sebastián de Belalcázar, en su lugar actual después de varios intentos fallidos, durante los años de 1535 y 1536. El trazado inicial de la aldea, consistió en una retícula sencilla e imperfecta, debido a que no se trazaron correctamente los ángulos rectos desde la plaza mayor, factor que repercutió en las otras manzanas trazadas, para el reparto de los primeros pobladores. Este primer poblado estaba compuesto por tres calles en sentido este-oeste, paralelas al río, cruzadas por 7 calles en sentido norte-sur, es decir, 15 manzanas de las cuales se obtuvieron 40 solares de vivienda para alojar a los fundadores (*Aprile*, 1991).

Inicialmente las manzanas, de 80 a 90 metros, se dividieron en 4 partes, dando como resultado solares de 40 a 45 metros, en los cuales la cuadra se define por muros de guadua que unen las viviendas. En estas primeras construcciones predomina el bahareque con techo de paja. Paulatinamente el interior se va densificando con la anexión de otros espacios y se reemplaza el bahareque por muros de tapia pisada comprimida en formaletas de guadua, o por adobe de grandes dimensiones (paso de la utilización de materiales livianos a pesados), el cual se coloca en hileras alternadas y cruzadas de manera que es posible la aparición de edificaciones de dos plantas, especialmente en los solares esquineros de uso comercial (*Aprile*, 1991).

De acuerdo con *Aprile* (1981), inicialmente los terrenos de la parte baja del Barrio San Antonio, correspondían a zonas ejidales cercanas al sector donde residía el grupo social predominante (barrio La Merced).

4.3.2.2 Siglo XVII.

Cali crece por densificación en la traza, se realizan subdivisiones prediales debido a nuevas condiciones sociales. Predominan las técnicas constructivas indígenas con aportes españoles.

Se amplía la zona del grupo social predominante (El Empedrado) conformado por encomenderos, clero y capitanes, esta zona llegaba hasta La Merced. Igualmente la zona de la "Plebe", según terminología de la época, tiende a crecer hacia el Vallano, actualmente el barrio San Nicolás (*Aprile*, 1991).

Según Vásquez en su libro *Historia del desarrollo urbano de Cali* (1982), a finales del siglo XVII los terrenos ejidales habían sido ocupados por unas personas de gran influencia social. En el caso de San Antonio estaban en manos de Juan de Palacios Alvarado, quien se había también apropiado de los terrenos de las estribaciones de la Cordillera Occidental, los que en la actualidad corresponden a los barrios Aguacatal, Santa Rita, Belalcazar, El Nacional, San Cayetano, Los Cristales, Libertadores y Miraflores.

4.3.2.3 Siglo XVIII.

Continúa la subdivisión del módulo básico del solar, presentándose un fraccionamiento o subdivisión interna, que sería el patrón que identificaría el crecimiento urbano. Producto de esto se obtiene el lote en forma rectangular, estrecho y alargado, el cual caracteriza a la ciudad indiana mestizada (Aprile, 1991).

En este siglo, se produce un cambio progresivo al uso del adobe y de la tapia pisada. Debido a los continuos incendios las ordenanzas impulsan el cambio del techo de paja por el de teja de barro (Aprile, 1991).

Al año de 1706 los terrenos ejidos de Cali ya habían sido apropiados por terratenientes y por mandatos reales se les ordenó restituirlos. En la zona occidental de la ciudad, se restituyeron seis cuadradas de largo desde la última casa del Empedrado, sector del grupo social predominante, hacia la colina de San Antonio y la parte baja de San Cayetano. La respuesta de los terratenientes fue la de parcelar y vender lotes ejidos de 1/4 o 1/8 de solar en

sectores como El Vallano, El Calvario, Santa Rosa, Mano del Negro, La Chanca y San Cayetano (*Vasquez*, 1982).

En el año de 1746 el señor Juan Garcés de Aguilar donó el terreno donde hoy se ubica la capilla de San Antonio, inaugurada al parecer en julio de 1747 (*Quintero & Barandica*, 1984). Los terrenos correspondían a dos cuadras de ancho y dos de largo. En 1787 doña Antonia Josefa Vallecilla, nuera de Garcés de Aguilar, aumentó la donación inicial en la colina de San Antonio, e incluyó el Parque Isaías Gamboa y las tierras, ubicadas después de la carrera 10 y del sector que hoy ocupan las calles de piedra. Durante el resto del siglo XVIII la mayor parte de estas tierras estuvieron deshabitadas. Mientras que la parte baja de San Antonio fue parcialmente construida con casas de adobe (*Ortega*, 1995).

4.3.2.4 Siglo XIX.

San Antonio, comenzó a formarse a finales del siglo XIX, estaba habitado, en su parte baja, contigua a La Merced, por algunos comerciantes, funcionarios y propietarios de fincas; en su parte alta, mas próxima a la capilla de San Antonio, hasta “la calle de la acequia”, por artesanos, pulperos, maestros de escuela (*Vásquez*, 2001).

En este siglo también empezaron a llegar los primeros pobladores del sector del empedrado localizado en el costado oriental y parte alta del barrio. Los nuevos pobladores eran provenientes de Nariño y Cauca principalmente. Estas personas ocupaban predios pequeños en comparación a los de la parte baja del barrio.

Las primeras casas de la parte alta se construyeron hacia el norte frente a la casa de los Isaacs, las cuales eran de guadua, esterilla o embutidos con techos de paja o de guadua, que más tarde se reemplazaron por viviendas de bahareque con techos de lata (*Ortega, 1995*). Estos asentamientos tenían un carácter de una ocupación espontánea, por lo tanto las dimensiones de las manzanas son menores en relación con el resto del barrio.



Cali se extendía desde San Antonio hasta San Nicolás. Las casas eran mínimas, con techos de guadua en forma de canal o de teja. Existían inmensos solares con variedad de árboles nativos. Los únicos edificios altos eran las iglesias de San Pedro y San Francisco, con la Torre Mudéjar. Tomado de *Calero* (1983).

Figura 71. Panorámica del barrio San Antonio en 1880.



A la derecha se observa el lugar donde actualmente se encuentra el Parque Isaías Gamboa. Tomado de *Calero* (1983).

Figura 72. Vista de la antigua carrera 4 con calle 2, límite del barrio.



Tomada de Calero (1983).

Figura 73. Calle de San Antonio a finales del siglo. En el centro de la calle se observa el drenaje de aguas negras y lluvias XIX.



A la izquierda se observa el río Cali. En esta época las edificaciones de mayor altura eran los templos. Tomado de Calero (1983).

Figura 74. San Antonio a principios del siglo XX.

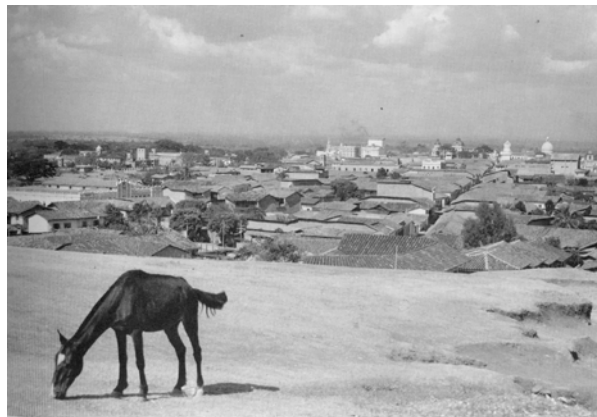


San Antonio a finales del siglo XIX principios del siglo XX. las casas tenían inmensos solares donde crecían frondosos mangos, nísperos, sapotes, badeas, granadas, mirtos y naranjas. Tomado de Calero (1983).

Figura 75. San Antonio a finales del siglo XIX.

4.3.2.5 Siglo XX

A comienzos del siglo XX continuaron llegando a la zona del empedrado del barrio San Antonio, personas provenientes de Cauca y Nariño. Fue tal el auge migratorio que, según testimonios, ya en 1918 todo este sector estaba poblado.



Tomado de Lenis, 1989.

Figura 76. Panorámica del barrio San Antonio tomada entre 1920 y 1930.



Figura 77. San Antonio en el año de 1925.



Figura 78. Al fondo la colina de San Antonio en 1917. Foto tomada desde el río Cali.



Figura 79. San Antonio desde el barrio El Peñón en 1920.



A mano derecha se aprecia la zona del empedrado, primer poblamiento de la parte alta. Aun no se había delimitado bien la colina y las viviendas aún no llegaban hasta el borde de la misma. Tomado del CD *Tertulias del Cali Viejo Memoria visual del siglo XX Vol III* (2000).

Figura 80. La zona de "El Empedrado" en el año de 1935.

En 1925 el Síndico de la Parroquia de San Antonio había iniciado la venta de los terrenos del barrio, incluyendo las tierras de la Calle de Piedra.

Por el año 1928, la ciudad de Cali se componía de seis barrios. De occidente a oriente, San Antonio, el Centro, el Vallano ó San Nicolás y el pueblo (de San Nicolás al cementerio). De sur a norte la Loma de la Cruz, el Centro y la Loma de las Mesa, hoy Granada (*Giraldo*, 1992).



Panorámica de San Antonio, 1920 a 1930. El barrio estaba conformado por un porcentaje alto de edificaciones de un piso, con cubierta en teja de barro. Tomado de *Lenis* (1989).

Figura 81. Panorámica del barrio San Antonio tomada entre 1920 y 1930

A partir de 1934 Monseñor Luis Adriano Díaz loteó los terrenos de la parte alta; la Diócesis nombró un ingeniero para la medición de los lotes y para el estudio de la expedición de las escrituras. Los predios ya estaban ocupados por humildes habitantes, quienes eran considerados arrendatarios por parte de la curia y a los cuales se les propuso la compra de los lotes. Algunos de los antiguos arrendatarios tuvieron que desalojar pues no tuvieron con que comprar los terrenos.

Hasta 1940 casi todos los predios de las calles de piedra fueron vendidos por la curia. El 28 de agosto de 1964 se realizó el Acuerdo de constitución como barrio.



Se aprecia la delimitación de la colina y el poblamiento de los terrenos aledaños. Tomado del CD *Tertulias del Cali Viejo Memoria visual del siglo XX Vol III* (2000).

Figura 82. Colina de San Antonio en el año de 1960.



Parte alta de San Antonio 1965. Se observa la planta de generación eléctrica y al fondo la planta de acueducto municipal. Tomado del CD *Tertulias del Cali Viejo Memoria visual del siglo XX Vol III* (2000).

Figura 83. Parte alta de San Antonio en el año de 1965.

4.3.3 Crecimiento demográfico

Según el historiador Víctor Daniel Bonilla, la conformación social a escala general, en el barrio San Antonio, es única y responde a estructuras de comienzos de siglo, estrictamente conservadoras, con valores independientes a los creados por la sociedad moderna. No responden a la concepción normal de pobreza, ni a la calificación de clase media-media que le otorga el Municipio (*Quintero & Barandica, 1985*).

El barrio San Antonio recibió parte de las migraciones que del campo venían hacia la ciudades, debido a los fenómenos político - económicos. Campesinos nariñenses, caucanos (paeces de Toribío) y del mismo Valle del Cauca, desplazados de sus parcelas por la violencia política conformaron dos polos de poblamiento de la zona alta: el del norte de la colina y, el más tardío, de la cuesta sur.

4.3.4 Densidad poblacional

El barrio tiene actualmente una población estimada de más de 4500 habitantes (*EMCALI, 1994, en SMP, 1998*), que ocupan más de 1060 viviendas repartidas en los 780 predios que conforman las 27 manzanas que lo componen (datos estimados a partir de *SMP, 1998*).

4.3.5 Conformación socio-económica y usos de las edificaciones

Según EMCALI (1994), en SMP (1998), el barrio está catalogado en el estrato III, medio - bajo. El uso predominante de las viviendas de tipo residencial, seguido de los usos mixtos (vivienda-comercio, vivienda-oficina, vivienda taller, vivienda educativo, etc).



Figura 84. Calle del barrio en un día de “calle del arte”.

De acuerdo con *SMP* (1998), el barrio San Antonio es en más de un 67 % de uso residencial; por lo menos un 10 % es de uso comercial, otro 10 % es de uso mixto (vivienda/comercio, vivienda/educativo, vivienda/taller, vivienda/oficina) y el 13 % restante pertenece a usos educativos, religiosos, institucional, etc.

4.4 DESCRIPCIÓN URBANÍSTICA Y SECTORIZACIÓN

4.4.1 Descripción urbanística.

Según *Quintero & Barandica* (1984), San Antonio no es un barrio colonial, sino desarrollado en la época republicana; no hay obras coloniales a excepción de la capilla, la cual refleja un estilo colonial tardío.

Más del 80 % de las viviendas son de uno y dos pisos (61 % de un piso y 19 % de dos pisos). El barrio conserva los vestigios de las manifestaciones arquitectónicas de tradición colonial, republicana, ecléctica y moderna, que conformaron el desarrollo de la construcción de vivienda popular en Cali. Alrededor del 73 % de sus edificaciones fueron construidas con técnicas de principios del siglo XX, en materiales como adobe y ladrillo.

La Capilla se ubica en la colina, la cual está surcada por muros de contención en piedra y se ha convertido en un mirador muy concurrido hacia la ciudad. Detrás de la Capilla, al oeste de la colina, se localiza el Acueducto Municipal (1927) y la planta de generación eléctrica (1965).

4.4.2 Sectorización

Según las normas urbanísticas generales presentadas en el estudio del *SMP* (1998), el barrio es considerado de interés patrimonial, por sus viviendas de tradición colonial y republicana. En el estudio, se plantea una sectorización que tiene en cuenta criterios arquitectónicos (estilos y tendencias), procesos

de transformación, consecuencias de deterioro, agrupaciones vecinales; ubicación geográfica y elementos culturales. Estos sectores se describen a continuación:

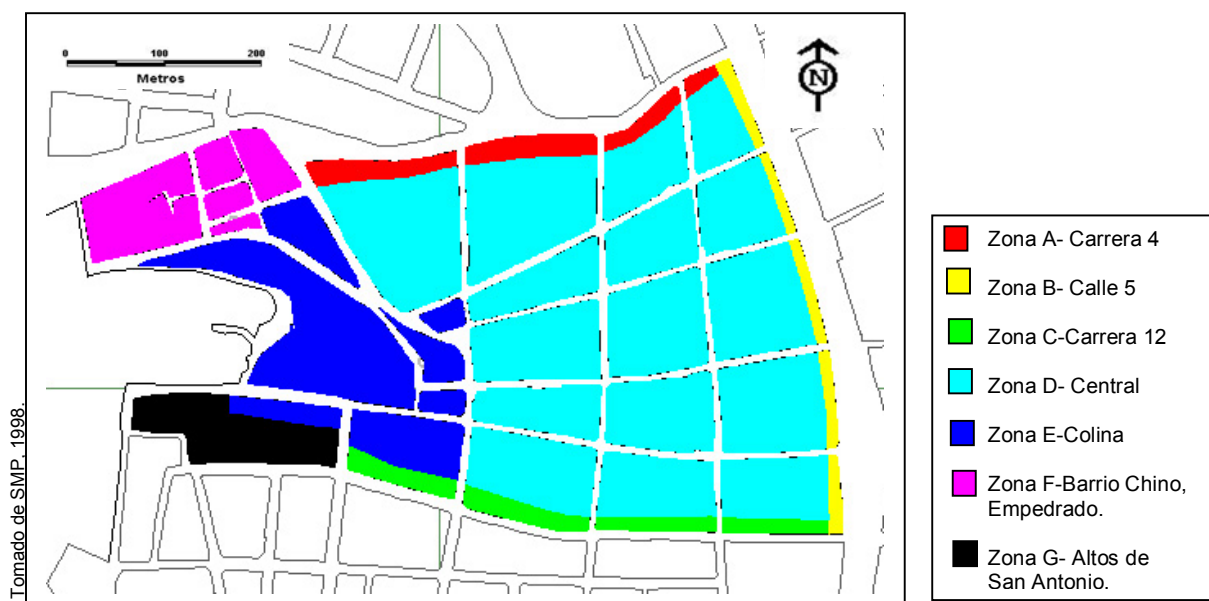
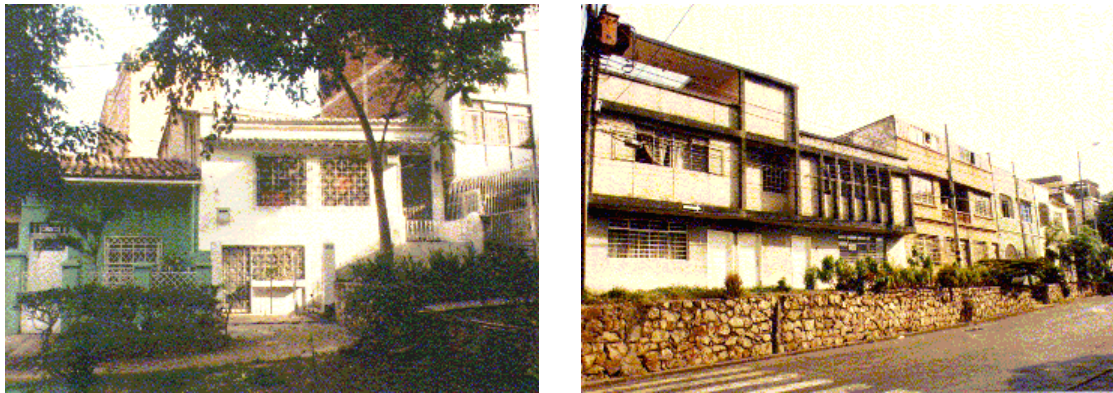


Figura 85. Sectores del barrio.

4.4.2.1 Zonas de frontera

Zona A- Carrera 4^a: predios comprendidos entre la Calle 5^{ta} y la Calle 2^a, sobre el costado sur de la Carrera 4^a. Esta zona se caracteriza por la presencia de edificaciones de tipo republicano y moderno, las alturas oscilan entre uno y dos pisos, y cuatro pisos. La pendiente del andén es variable, va desde el nivel 0,00 a ras con la vía, hasta alturas de 2,00 metros por encima de la vía, para luego retomar nuevamente el nivel de la calzada de alto flujo vehicular. En esta zona, se encuentra igualmente espacios para antejardín y

zona verde adyacente a la vía, el acceso amplio a la iglesia de Cristo Redentor y el Parque Isaías Gamboa. Es la única parte del barrio donde se encuentran edificios de apartamentos. Entre la Calle 3ª y la Calle 2ª el estilo de la arquitectura es esencialmente moderno. Igualmente se da una variedad de usos de tipo comercial y mixto. La carrera 4ª sirve de frontera entre el barrio San Antonio y la zona hotelera de Cali y el barrio el Peñón.



SMP, 1998

Figura 86. Zona A - Carrera 4ª

Zona B - Calle 5ª: predios comprendidos entre la Carrera 4ª y la Carrera 12 sobre el costado occidental de la Calle 5ª. Esta zona es la que ha sido mayormente transformada, debido a la construcción y ampliaciones de la Calle 5ª. La arquitectura existente en esta zona es moderna y los usos son comerciales. En esta zona las alturas oscilan entre uno y cuatro pisos.

Es una de las zonas más afectadas por los cortes bruscos que han originado “muelas”, retrocesos y culatas, que afectan la imagen del barrio. Esta fachada urbana hacia la ciudad amerita un estudio especial. La calle 5ª es la frontera física entre el barrio San Antonio y el centro histórico de la ciudad.



Figura 87. Zona B – Calle 5ª

Zona C- Carrera 12: predios comprendidos entre la Calle 5ª y la Calle 3ª Oeste sobre el costado norte de la Carrera 12. Es la zona que sirve de frontera física con el barrio San Cayetano, de acuerdo a la zonificación territorial para el municipio de Santiago de Cali, el costado norte de la carrera 12, forma parte del barrio San Antonio, el costado sur de la Carrera 12, pertenece al barrio San Cayetano.

Esta zona es una de las más transformadas, ya que las viviendas se han ido reemplazando por edificaciones modernas, que van en aumento hacia la Calle 5ª. Sobre este costado norte de la Carrera 12ª, se encuentran viviendas de todos los estilos arquitectónicos, pero predomina la tendencia de arquitectura ecléctica y moderna.



SMP, 1998

Figura 88. Zona C – Carrera 12

4.4.2.2 Zonas internas

Zona D- zona central: predios comprendidos entre la Carrera 4ª y la Carrera 10 y entre la Calle 5ª y la Calle 2ª. Es la zona que ofrece el mayor interés y valor patrimonial, debido a la presencia de viviendas de diferentes estilos, que conservan sus características y elementos arquitectónicos, aunque las alturas varían, la tendencia es edificaciones entre uno y dos pisos. Se observa en esta zona viviendas de tradición colonial, republicano, ecléctico y algunas de estilo moderno; cuya presencia no es representativa (SMP, 1998).

De acuerdo con SMP (1998) la parte externa y urbanística, a nivel de fachadas, perfiles urbanos y volumetrías de las viviendas, como su interior, se resalta la presencia de amplios solares y patios interiores, característicos del barrio y con una calidad espacial, estética y arquitectónicas únicas.



Figura 89. Zona D ó Central

ZONA E - Zona Colina: predios que colindan con la Colina de San Antonio. En esta zona se combina el elemento de la belleza arquitectónica con el paisajístico que ofrece el panorama de la colina y la perspectiva sobre la ciudad, que alcanza una vista completa al llegar a la cima de la colina, igualmente se aprecia la techumbre en teja de barro y las callejuelas del barrio, que recuerdan, el interés patrimonial del mismo (SMP, 1998).

Alrededor de la colina se encuentran viviendas de diferentes estilos; sobre la calle 1ª, encontramos casonas de estilo ecléctico que sirven de marco a la zona verde de la colina y de remate a las diferentes carreras, que vienen desde el centro histórico de la ciudad, se ven interrumpidas por la calle 5ª, pero continúan su trayecto hasta la colina, dejando constancia de un trazado reticular, legado de la historia del sector. Sobre la carrera 10, se encuentran viviendas de diferentes estilos, la mayoría han sido transformadas o son construcciones contemporáneas, su altura oscila entre uno y dos pisos (SMP, 1998).



Figura 90. Zona E- Colina de San Antonio.

Zona F- Barrio chino o del Empedrado: es uno de los sitios de mayor interés en el barrio, por sus callejuelas empedradas, sus pasajes estrechos y por la manera como se han dispuestos las viviendas, andenes y escaleras en la empinada pendiente de la colina. En el "barrio chino" o el empedrado se encuentra una arquitectura vernácula, que habla de la riqueza popular de los habitantes de este sector del barrio y de la ciudad, los materiales de las viviendas son particulares, caracterizadas por los techos en zinc, los muros en adobe y las calles en piedra (*SMP*, 1998).

Se encuentran igualmente viviendas de estilo ecléctico de gran valor arquitectónico y estético. Este sector del Empedrado sirve de frontera al barrio en la parte occidental con el parque del acueducto (*SMP*, 1998).



Figura 91. Zona F - Empedrado ó “Barrio Chino”

ZONA G- Altos de San Antonio: predios comprendidos entre la Calle 3ª Oeste y la Calle 2ª Oeste y entre la Carrera 10 y la Carrera 12. Esta zona se encuentra en el extremo occidental del barrio, se podría afirmar que por sus características no forma parte de la zona de interés patrimonial, dado que sus viviendas son básicamente contemporáneas, y por su conformación, dan la impresión de haber sido parte de un asentamiento irregular, que se adapta a la geografía y las pronunciadas pendientes, pero que no responde a ningún criterio planificador, ni a una retícula ortogonal (*SMP*, 1998).

Las viviendas presentan diferentes tipos de altura, desde un piso hasta cinco ó más pisos o niveles. Los materiales son contemporáneos. Las viviendas se encuentran en procesos de construcción. Esta zona sirve de frontera física entre el barrio, sector de la colina y el barrio San Cayetano y el Parque del acueducto.



Figura 92. Zona G - Altos de San Antonio.

4.5 EVOLUCIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES

Para el presente trabajo se tomaron las clasificaciones estilísticas realizadas en el estudio: *"Plan de Recuperación Urbanístico y Arquitectónico del Barrio San Antonio 1998 -2000"* (SMP, 1998). No obstante, como bien reconoce Waisman (1993):

"No se ha dado en América Latina un desarrollo estilístico coherente o que permita descubrir una continuidad en las ideas arquitectónicas, pues, a lo largo de siglos, la arquitectura ha estado basada en ideas trasculturadas que se interpretaron, modificaron, o transformaron de acuerdo con circunstancias histórico-culturales-tecnológicas, locales". Es decir, las clasificaciones estilísticas no pueden ser tomadas como caracterizaciones estrictas, pues no corresponden a una periodización histórica claramente delimitada.

Los edificios del barrio San Antonio son más un producto de la transformación a raíz de influencias externas, las cuales han generado una concatenación e intersección de cada tipo arquitectónico con el próximo y de esa conjunción surgen "*híbridos*", como en el caso de la vivienda republicana, que conserva el alero y los mismos materiales coloniales, si bien, a lo ornamental se le da un mayor desarrollo.

De igual forma, en las viviendas de estilo ecléctico (definición retomada del *Plan de Recuperación Urbanístico y Arquitectónico del Barrio San Antonio 1998 -2000*, se adosa, en algunas, una fachada en un material diferente en la búsqueda de una imagen que pretende diferenciarse de la anterior con la eliminación de ese símbolo inequívoco de la arquitectura colonial que es el alero. Aunque en el interior de la vivienda se conserven los muros de adobe, que son vestigios del estado original. Estas hibridaciones y trasculturaciones que se manifiestan en la estética de las viviendas, aportan elementos de análisis para el diagnóstico, de manera cualitativa, de la vulnerabilidad sísmica del barrio San Antonio.

Las edificaciones que conforman el barrio corresponden a diversas manifestaciones arquitectónicas que marcaron de alguna manera el desarrollo urbano de la ciudad de Cali. La mayoría de las viviendas objeto de este estudio, se construyeron antes de la primera mitad del siglo XX y corresponden a estilos arquitectónicos colonial, republicano y ecléctico que suman el 73 %; el 27 % restante de las viviendas de uno y dos pisos del barrio son de estilo moderno.

Según el estudio de la *SMP* (1998), la evolución de las construcciones en el barrio se desarrolló de la siguiente forma:

4.5.1 Tradición colonial.

Arquitectura del Siglo XV al Siglo XVIII; es el resultado de la influencia de la colonización española, basada en las Leyes de Indias, en lo que es determinante el trazado reticular, la arquitectura religiosa, militar y la vivienda. Se destaca la Capilla localizada en la Colina (250 años) y las viviendas que conservan rasgos de esta arquitectura.

Características de las edificaciones. Altura de un piso, muros en bahareque ó adobe, cubierta en teja de barro, algunas en zinc, la fachada presenta de uno a dos vanos, puertas y ventana en madera, presencia de aleros hacia la vía, en algunos casos se observan vigas en los aleros, los muros son pintados con cal, los colores de puertas y ventanas son primarios. Generalmente conservan un patio solar posterior.



Figura 93. Capilla de San Antonio construcción colonial (1747) y Cámara de Comercio de Cali sede San Antonio.

4.5.2 Republicano.

Arquitectura del Siglo XIX y principios de siglo XX. Corresponde a un momento histórico, en el cual se dan los usos institucionales; en este estilo aparecen expresiones del neoclasicismo y neogotismo, forma parte de un periodo de transición.



Figura 94. Edificaciones estilo republicano

Características de las edificaciones. Altura por lo general de un piso (4 m a 6 m), muros en adobe hasta de ochenta centímetros y un metro de espesor; aparecen ritmos de ventanas y puertas en fachadas, las dimensiones de las ventanas y puertas varían hasta los 3 m; aparecen rejas y elementos decorativos en vanos; se encuentran elementos decorativos y materiales arcillosos en fachadas, al interior está dispuesto un amplio patio central, acompañado de plantas, fuentes y corredores, donde aparecen barandas, pilares y balaustres en madera, combinados con elementos metálicos y basamentos para los pilares. La cubierta es en teja de barro, el tamaño de la teja es mayor, se encuentran tejas hasta de 50 cm.

4.5.3 Ecléctico.

Arquitectura de transición hacia el modernismo y el postmodernismo; recoge diferentes elementos de composición y decorativo. Por definición la arquitectura ecléctica responde a una manifestación de diferentes formas, estilos, característicos de una arquitectura vernácula, popular, que incorpora nuevos materiales y acabados (SMP, 1998).

Características de las viviendas. Altura de dos pisos, muros en ladrillo, cubierta en teja de barro, se suprime el alero; aparecen formas y elementos decorativos como cornisas y vanos con formas geométricas; carpintería metálica en puertas y ventanas; se eliminan los patios estilo republicano, corredores y pilares; en fachada aparecen enchapes, texturas, colores fuertes, marquesinas, los zócalos se tratan con texturas. No existen ritmos, ni composiciones simétricas en fachada.



SMP, 1998.

Figura 95. Edificaciones de estilo ecléctico.

4.5.4 Moderno popular.

Arquitectura de mediados y finales de siglo; influenciada por la proliferación de nuevos materiales, tecnologías y estilos. Cuando la construcción se hace sobre una vivienda consolidada, se presenta una transformación de la edificación, al nivel de fachadas, cubiertas, aleros; se presentan demoliciones, retrocesos; se cierran vanos, cambian acabados, materiales y texturas en fachadas; los usos también son diferentes, eliminándose en algunos casos el residencial; algunas edificaciones son para vivienda multifamiliar, aparece el garaje, el sótano y semisótano como un elemento importante en fachada. Algunas veces, aunque la vivienda es transformada, conserva su estructura original.

Características de las edificaciones. La altura varía de uno , hasta más de cuatro pisos. Los materiales en que están construidas son el ladrillo, hormigón y estructuras metálicas; los acabados en yeso, cemento, arcillas y sintéticos; hay diversidad de enchapes, aparecen terrazas, retrocesos, voladizos, los balcones son de mayor tamaño; los vanos en ventanas también son mayores; generalmente se suprimen los aleros; además de utilizar la teja de barro, como material para la cubierta se utilizan otros como el asbesto-cemento, acrílicos, sintéticos, plásticos y losas de hormigón.



SMP, 1998

Figura 96. Edificaciones de estilo moderno- popular.



SMP, 1998

Figura 97. Edificaciones modernas de mas de tres pisos.

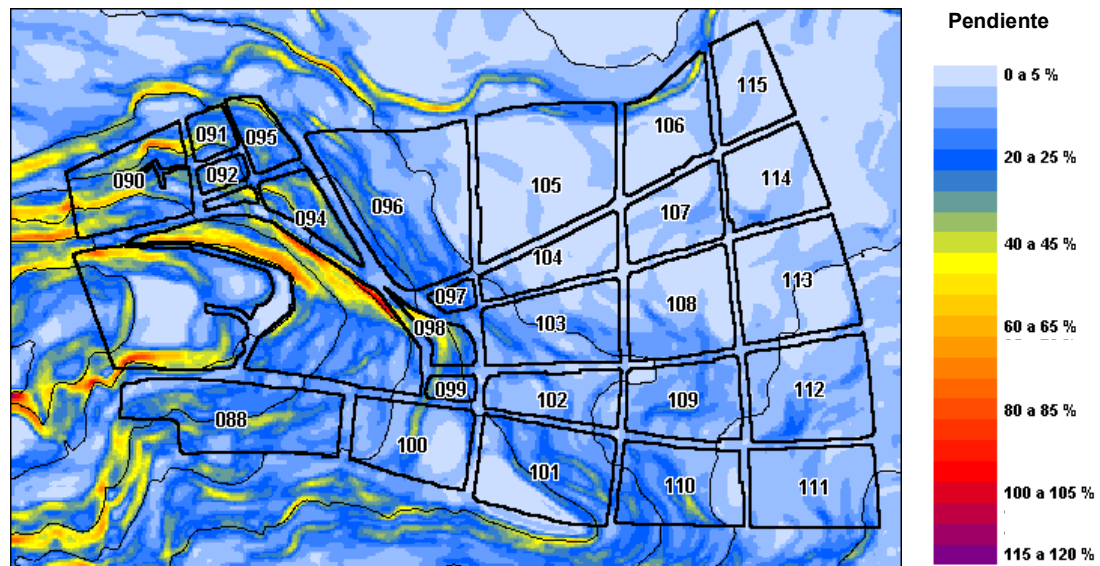


Figura 99. Modelo de pendientes del barrio.

Según el mapa de unidades geológicas del “*Plan para la mitigación de riesgos en Cali*” la zona de estudio está asentada sobre terrenos diabásicos de la Cordillera Occidental, suprayacidos por depósitos torrenciales antiguos (Qd) de estratos de gravas y arenas, con intercalaciones de capas de cenizas volcánicas.

De acuerdo con las exploraciones geotécnicas realizadas en la Planta de Tratamiento río Cali, parte alta (Parra, 1999), se puede decir que las características del subsuelo son relativamente buenas en lo referente a la consistencia del terreno con valores de SPT (Ensayo de Penetración Estándar) que varían entre 30 y 50 golpes, a profundidad mayor de 3 m, al

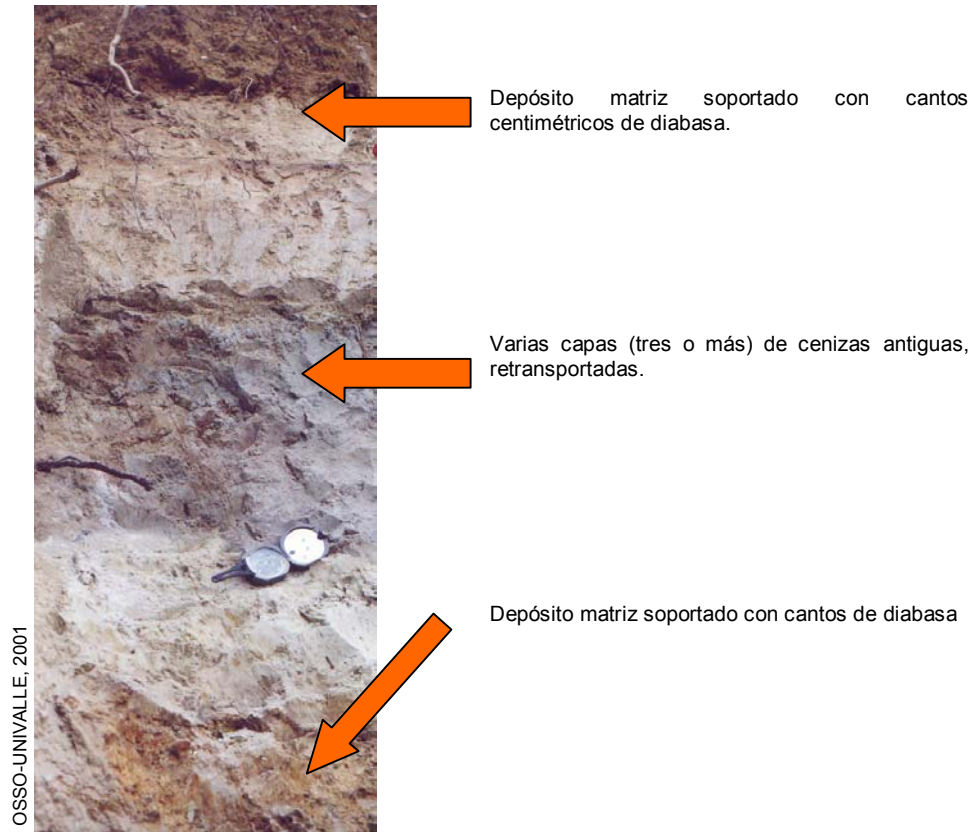


Figura 101. Corte estratigráfico ubicado en la Avenida Circunvalar, parte alta del barrio San Antonio

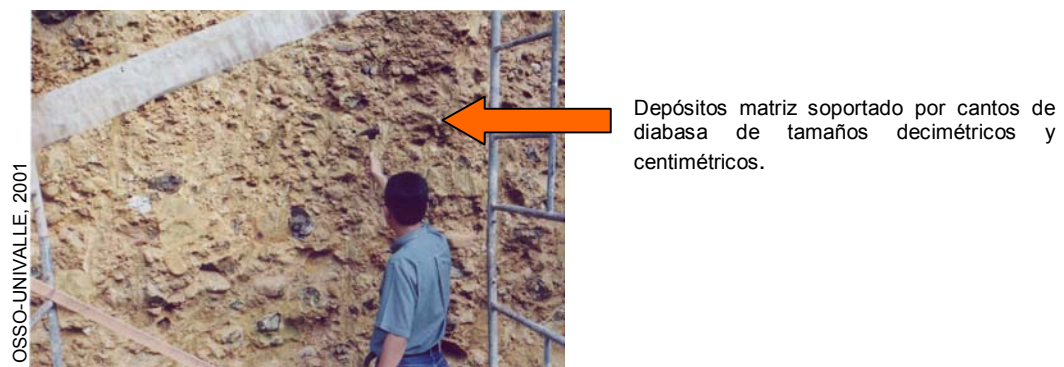


Figura 102. Conformación del suelo en el barrio San Antonio, Avenida Circunvalar



Figura 103. Corte estratigráfico ubicado en la parte alta del barrio Avenida Circunvalar.

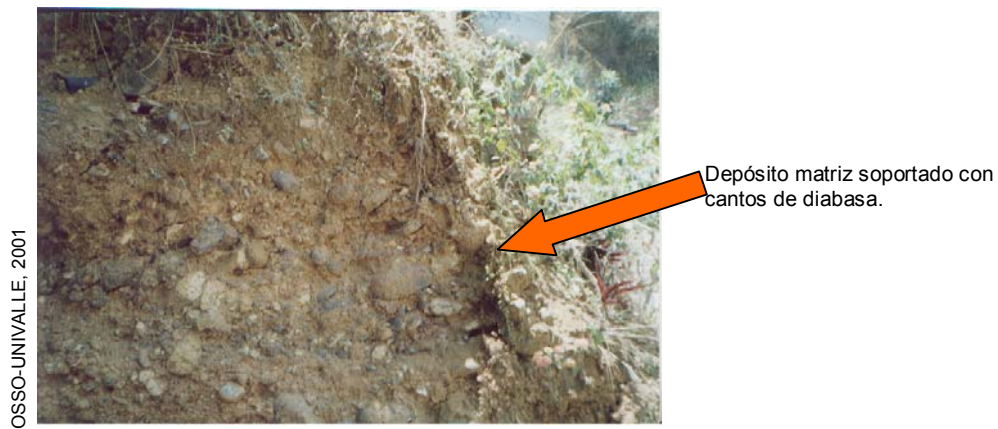


Figura 104. Corte estratigráfico localizado en la parte baja del Acueducto Municipal en límites con el barrio San Cayetano.

4.6.2 Efectos locales de la zona de estudio.

4.6.2.1 Efecto de sitio por geología.

El suelo sobre el cual está asentado el barrio conforma un tipo de perfil de suelo S1, caracterizado según la NSR-98 (Capítulo A.2), como un perfil que entre la roca y la superficie está conformado por suelos duros o densos con un espesor menor a 60 m, compuesto por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras con una velocidad de onda de corte mayor o igual a 400 m/s.

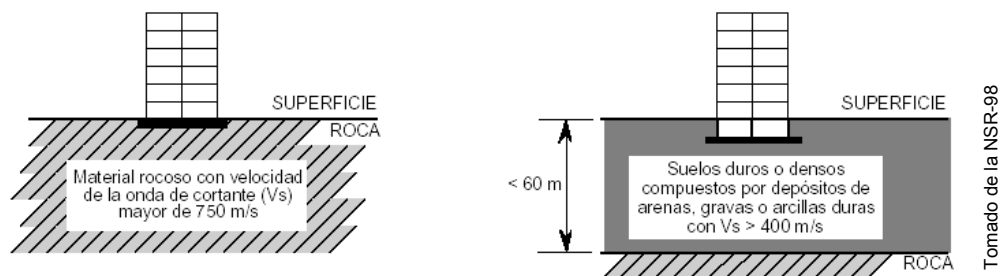


Figura 105. Perfil S-1 de la NSR-98.

Los ensayos de microtrepidaciones realizados por *Rosales* (2001), en el parque del barrio San Antonio, aproximadamente a unos 20 metros de la capilla, determinaron que:

"La relación espectral H/V no muestra ninguna frecuencia fundamental para el rango de observación entre 0 y 10 Hz, cuya amplitud esta alrededor de 2, es decir no hay amplificación". Este resultado indica la presencia de terrenos

rocosos, suelos duros o consolidados, donde no se presenta lo que se conoce como efecto de sitio, a causa de los depósitos de suelos.

Aunque que todavía no se cuenta con los resultados del proyecto de *"Microzonificación Sísmica de Cali"*, la determinación del coeficiente de sitio de la zona de estudio con base en los análisis de los ensayos de microtrepidaciones efectuados por *Rosales* (2001), parecen confirmar los resultados obtenidos de la prezonificación de los suelos de Cali (estudios realizados por el OSSO), así como con los estudios de suelos existentes y la caracterización de los depósitos de suelo a partir de análisis directos de cortes estratigráficos. Sin embargo es necesario contar con el estudio de microzonificación para confirmar esta hipótesis.

Por su localización en una zona de ladera aun faltaría por determinar una probable incidencia del efecto topográfico en la amplificación sísmica.

5. REVISIÓN DE LITERATURA SOBRE METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES

5.1 GENERALIDADES

La mayoría de los asentamientos del tercer mundo están conformados por edificaciones que obedecen a la construcción tradicional, en su mayoría de mampostería no reforzada, en materiales como adobe, tapia pisada y ladrillo cocido, siendo reconocidas a nivel mundial como sistemas estructurales muy peligrosos, cuando no han sido diseñados adecuadamente para soportar las solicitaciones sísmicas (ATC-21, 1988, en *Campos*, 1992).

El inventario de este tipo de edificaciones es amplio, lo que significa que numerosas personas están en riesgo de sufrir las consecuencias de un terremoto. El conocimiento del comportamiento sísmico de las edificaciones existentes permite estimar el grado de vulnerabilidad sísmica de las estructuras, identificando las más susceptibles a sufrir daño.

Los métodos se agrupan en dos categorías generales, los de **vulnerabilidad calculada y vulnerabilidad observada**. Entre las metodologías desarrolladas en varios países se encuentran las Técnicas de *Screening* elaboradas durante la década de 1960 y 1970; método *Japones* (Hirosawa, 1992); método *del ATC-14* (1987), ATC 21 (1988); método *NAVFAC* (Matzamura, J. Nicoletti y S. Freeman, 1988); método *Mexicano* (J. Iglesias, 1989); método

Colombiano (Hurtado,1990); método de la NSR-98, (AIS, 1997), método Italiano del *Índice de Vulnerabilidad para estudios de Vulnerabilidad Sísmica a Gran Escala* VSG GNDT (1986), entre otros.

Una recopilación detallada de las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, realizada por el autor del presente trabajo, fue utilizada como contenido para el desarrollo del proyecto de grado: "*Estudio piloto de vulnerabilidad sísmica en viviendas de 1 y 2 pisos del barrio Cuarto de Legua en el Cono de Cañaveralejo (Cali, Colombia)*", de Chavarría & Gómez (2001), Universidad del Valle (2001), por lo tanto se sugiere remitirse a dicho estudio.

A continuación se presenta una descripción general de los métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes

5.2 MÉTODOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES EXISTENTES

Los métodos se agrupan en dos categorías generales (figura 106), los de *vulnerabilidad calculada* y de *vulnerabilidad observada* (Caicedo et al, 1994). En la primera se utilizan técnicas de modelación estructural para simular el comportamiento sísmico bajo cargas dinámicas y resultados de ensayos de materiales en el laboratorio, que sirven para determinar el índice global de daño que puede presentar la edificación, y se calibra a partir del daño real observado de las estructuras sometidas a movimientos telúricos anteriores. Dentro de esta categoría se encuentran *los métodos analíticos*.

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



Figura 106. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica.

5.2.1 Métodos analíticos.

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes por métodos analíticos se fundamenta en los principios utilizados para el diseño de estructuras nuevas estipuladas en los códigos de construcción. La evaluación de estructuras existentes por métodos analíticos se concentra primordialmente en la modelación de edificios de hormigón armado, en los cuales se utilizan modelos mecánicos para representar su comportamiento histerético, con el fin de determinar los niveles de daño para los elementos estructurales o de la estructura misma en su conjunto (Caicedo et.al, 1994).

Según *Caicedo et.al* (1994), los problemas asociados con los métodos analíticos, básicamente provienen de las dificultades intrínsecas de la modelización matemática de las estructuras reales. Uno de los inconvenientes de la utilización de los métodos analíticos se presenta a la hora de calibrar el indicador de daño calculado con el daño real observado en las edificaciones después de un sismo.

Las múltiples incertidumbres para evaluación del daño sísmico de una estructura, surgen desde el planteamiento de las hipótesis del modelo para el análisis estructural y la selección de los movimientos sísmicos del terreno.

Respecto al análisis estructural, las propiedades reales 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 el 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.

Así mismo, con relación a la selección de los movimientos sísmicos del terreno resulta complejo identificar las características del movimiento que describen la capacidad destructiva de un terremoto, razón por la cual el movimiento del terreno es una de las fuentes de mayor incertidumbre.

En conclusión debido al impreciso e incompleto entendimiento del comportamiento estructural de los edificios de hormigón 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 ejecutar a gran escala.

5.2.2 Métodos subjetivos.

Los métodos subjetivos son los más apropiados para la evaluación de edificaciones a gran escala, debido que arrojan resultados más rápidos para un sin número de tipologías constructivas, que pueden ser determinantes para la toma de decisiones en el ámbito de la mitigación del riesgo, en una región determinada. En éstos se introduce la opinión subjetiva de expertos y la utilización de datos empíricos, acumulados mediante la observación de daños sufridos por las estructuras en terremotos pasados. Según *Caicedo et.,al* (1994) los métodos subjetivos se pueden clasificar en dos grupos: los que predicen el daño y los que evalúan la capacidad (figura 107).

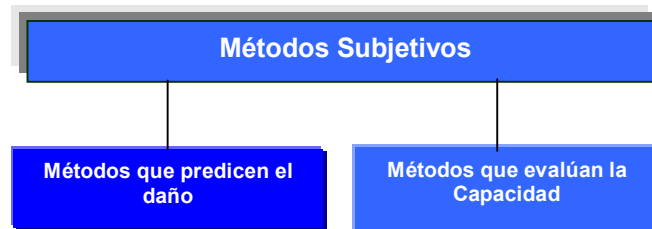


Figura 107. Clasificación de los métodos subjetivos.

5.2.2.1 Métodos que predicen el daño.

Permiten la estimación del daño de una estructura a través de dos tipos de relaciones matemáticas:

La primera es una relación discreta, con base en matrices de probabilidad y la segunda es una relación continua, con base en funciones de vulnerabilidad (figura 108).

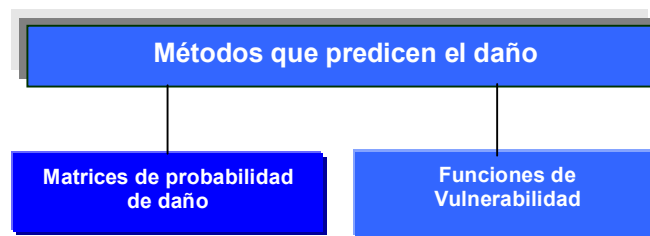


Figura 108. Clasificación de los métodos que predicen el daño.

1. Métodos con base en matrices de probabilidad de daño.

La vulnerabilidad sísmica de una estructura puede ser expresada a través de una **matriz de probabilidad de daño**, la cual define la distribución del daño sísmico de una tipología estructural para una intensidad sísmica dada.

Generalmente, estas matrices se deducen por medio de un análisis estadístico del daño observado en las estructuras después de ocurrido un terremoto o también por el criterio subjetivo de expertos.

En la tabla 6 se muestra un ejemplo de una matriz de probabilidad de daño para una estructura hipotética. Cada columna representa un nivel distinto de intensidad sísmica y cada fila representa un nivel distinto de daño estructural, según *Caicedo et, al* (1994).

Tabla 6. Matriz de vulnerabilidad sísmica de edificios de hormigón armado

Nivel de Daño	Intensidad del Sismo		
	0.06 g	0.12 g	0.24 g
1. Ninguno, menor	0.75	0.24	0.1
2. Ligero, moderado	0.24	0.6	0.45
3. Serio, grave	0.01	0.155	0.4
4. Colapso	0.0	0.005	0.05

Tomado del ejemplo de una matriz de probabilidad de daño en *Caicedo et.,al* (1994)

2. Métodos con base en funciones de vulnerabilidad.

Una función de vulnerabilidad es una relación matemática que expresa de forma continua el daño que experimenta una estructura cuando es sometida a un movimiento sísmico. Las funciones de vulnerabilidad se deducen por medio de regresiones estadísticas, a partir de los datos de daño observados como consecuencia de terremotos anteriores. Generalmente, estas funciones se expresan como curvas que relacionan el grado de daño del edificio, con un parámetro de respuesta estructural o del movimiento del terreno.

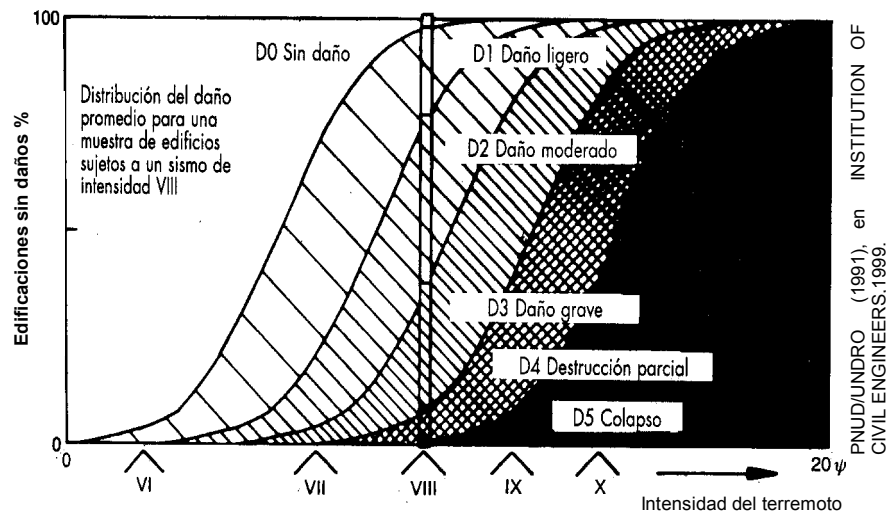


Figura 109. Función de vulnerabilidad de edificaciones de mampostería.

Los parámetros de respuesta estructural que comúnmente se utilizan son el desplazamiento horizontal del edificio Δ y el coeficiente sísmico C , que se define como el factor entre la resistencia al cortante del edificio dividido por el peso del edificio. Por otro lado, los parámetros que expresan el movimiento del terreno son usualmente la aceleración máxima del terreno (PGA), o los grados de intensidad sísmica tomadas de las escalas MM, MSK ó EMS.

En la figura 111 se muestra las funciones de vulnerabilidad desarrolladas por *Petrini & Benedetti* (1984), en *Cherubini* (1998) , donde se relacionan el índice de daño sísmico que puede sufrir una edificación para diversos valores de aceleración ó intensidad, a partir de un índice de vulnerabilidad determinado.

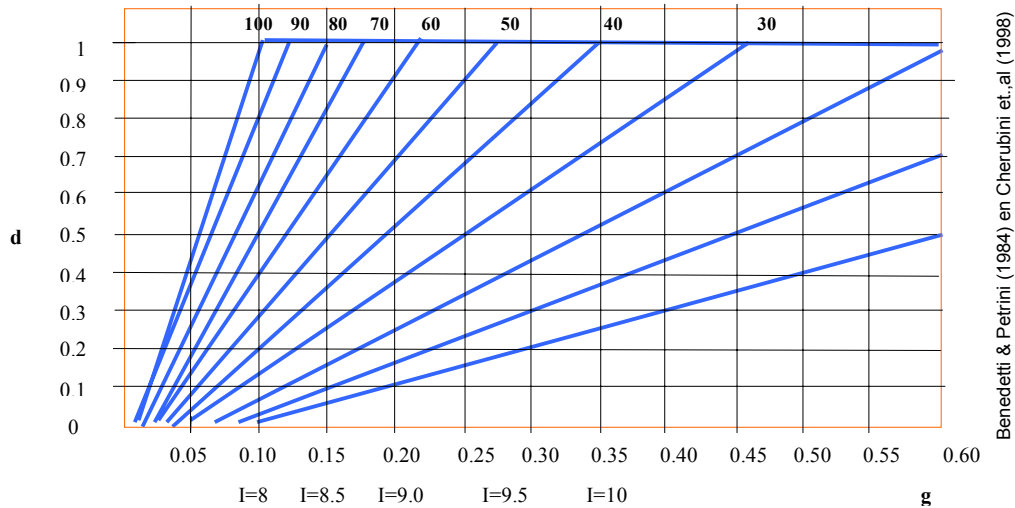


Figura 110. Función de daño sísmico

5.2.2.2 Métodos que evalúan la capacidad sísmica.

Estos métodos evalúan la capacidad sísmica relativa de una estructura. Básicamente existen dos tipos los que califican de forma empírica las diferentes características de las estructura y los que compararan la capacidad actual de la estructura con la exigida por un determinado código de construcción (figura 111).

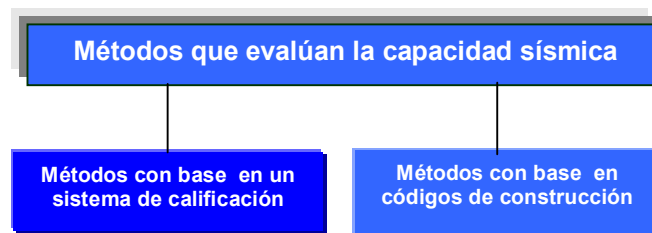


Figura 111. Métodos que evalúan la capacidad sísmica.

1. Métodos con base en un sistema de calificación.

Estos métodos utilizan una escala de valores para calificar la calidad de las diferentes características estructurales, constructivas, funcionales ó arquitectónicas de una edificación, a las que se les asigna un valor numérico (a veces afectados por un factor de ponderación o corrección), cuya suma total representa la vulnerabilidad sísmica.

- Entre estos métodos se encuentra el **Método de evaluación de campo** (*Culver et., al ,1975, en Caicedo et., al, 1994*), que emplea cinco formularios para el levantamiento de información general y estructural, que se utilizan para catalogar la edificación como buena, regular, pobre o muy pobre, de acuerdo al puntaje obtenido y al nivel de intensidad (MM MSK ó EMS), para el sitio.
- En el **Método del factor de decisión** (*General Services Administration, (1976), en Caicedo et., al, 1994*) se analizan una serie de características de la edificación como la funcionalidad, el criterio de confianza, la ubicación del edificio, y la sismicidad del sitio, a las cuales se les asigna un factor numérico. A la suma de dichos números se le denomina *factor de decisión*, el cual determina el tipo de análisis que se debe utilizar para evaluar la resistencia sísmica de la edificación. El *factor de decisión* también puede utilizarse directamente como una medida cualitativa de la vulnerabilidad de la edificación considerada.
- En Nueva Zelanda (*Shepherd, 1977, en Caicedo et., al, 1994*), para calificar los edificios altamente peligrosos, se utiliza un sistema empírico.

Entre las características que se analizan se encuentra el tipo de estructura, el número de pisos, el daño de la estructura, la calidad de los muros, el diafragma y la cimentación. La suma de los puntajes asignados a cada una de las anteriores características se utiliza para determinar por medio de una tabla empírica, un periodo de revisión, en el cual la edificación debe ser analizada nuevamente y un periodo de vida para el cual la edificación debe ser demolida o reforzada. Este resultado sirve como medida cualitativa de la vulnerabilidad de la edificación.

- **El Método del índice de daño** (*Uzcátegui & Quintero 1988, en Caicedo et., al, 1994*) evalúa la vulnerabilidad sísmica mediante la determinación de un índice de daño (**Id**) , el cual describe la capacidad sísmica de la estructura. Consiste en asignar un valor numérico (**Vi**) que califica la edad, el número de pisos, la proximidad entre edificios, el mantenimiento, la cimentación, la densidad y localización de muros, los detalles constructivos, los elementos no estructurales, los diafragmas, el sistema estructural, la masa, la rigidez, las irregularidades y los daños anteriores. A cada una de estas características se le asigna un factor de peso (**Wi**), de acuerdo con su importancia global para la resistencia del edificio; así, por ejemplo, a la localización de muros se le asigna un factor de peso mayor que a la condición de mantenimiento. El índice de daño se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Id = \frac{\sum Vi \times Wi}{\sum Wi}$$

Finalmente, de acuerdo con una interpretación subjetiva de la escala MSK, EMS ó MM, se determina que para valores **Id** ≤ **0.4** el nivel de

riesgo sísmico para la estructura es aceptable y que para valores de $I_d \geq 0.4$ se debe utilizar otro procedimiento más sofisticado para la evaluación de la edificación (Uzcategui & Quintero 1988, en Caicedo et., al, 1994).

- **Método del índice de vulnerabilidad** (Petrini & Benedetti, 1984).

El método del índice de vulnerabilidad propuesto por estos autores considera once parámetros para calificar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería no reforzada (MNR) y edificaciones de hormigón armado (HA). Éstos son el tipo de organización y calidad del sistema resistente, la resistencia convencional, la posición del edificio y la cimentación, los entrepisos, la configuración en planta, la configuración en elevación, la separación máxima entre muros, el tipo de cubierta, los elementos no estructurales y el estado de conservación.

Los parámetros son calificados en función de la escala numérica desarrollada por los autores del método, en la cual se le asigna una calificación K_i a cada valor de la escala de gradación, desde **A** hasta **D**, donde A es óptimo y D es pésimo (ver tabla 7). Una vez obtenidas las calificaciones parciales (A, B, C, D), de cada uno de los parámetros analizados, estas son afectadas por un factor de peso según el grado de importancia de cada parámetro en relación con los demás. A partir de los valores obtenidos, se cuantifica la vulnerabilidad global de la edificación mediante una suma ponderada, a este valor se lo conoce como Índice de Vulnerabilidad (I_v), según la expresión:

$$I_v = \left(\sum_{i=1}^{11} K_i * W_i \right)$$

Índice de vulnerabilidad para edificaciones en MNR
Petrini y Benedetti (1984) en Jiménez, 2000.

Donde: **K_i** es la calificación asignada y **W_i** es el coeficiente de peso, **I_v** índice de vulnerabilidad.

Tabla 7. Matriz de calificación de la vulnerabilidad de edificaciones mampostería, método del índice vulnerabilidad.

Num	Parámetro	K _i A	K _i B	K _i C	K _i D	Peso W _i
1	Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1
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	Entrepisos	0	5	15	45	1
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1

Calificaciones y pesos de los ítems de vulnerabilidad para edificaciones MNR (Petrini & Benedetti (1984), en Jiménez 2000.

Los valores de vulnerabilidad obtenidos como resultado de la calificación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en MNR, está comprendida en un rango de valores entre 0 y 382.5, que son normalizados al dividirlos ente 382.5, obteniendo un rango de variación ($0 < I_v < 100$). Por otra parte, los valores adoptados para la calificación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de hormigón armado (HA), toma valores entre 0 y 85, según la ecuación:

$$I_v = 10 \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{11} K_i * W_i \right) + 1}{4} \right]$$

Índice de vulnerabilidad para edificaciones de hormigón armado
(HA) Petrini & Benedetti (1984) en Jiménez, 2000

Tabla 8. Matriz de calificación de edificios de hormigón armado.
método del Índice de vulnerabilidad

Num	Parámetro	Ki A	Ki B	Ki C	Peso Wi
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	Entrepisos	0	1	2	1.0
6	Configuración en planta	0	1	2	1.0
7	Configuración en elevación	0	1	3	2.0
8	Separación máxima entre muros	0	1	2	1.0
9	Tipo de cubierta	0	1	2	1.0
10	Elementos no estructurales	0	1	2	1.0
11	Estado de conservación	0	1	2	2

Calificaciones y pesos de los ítems de vulnerabilidad en HA (Petrini & Benedetti (1984), en Jiménez, 2000)

A partir del índice de vulnerabilidad se puede estimar el nivel daño que puede sufrir una edificación en función de la aceleración del terreno. El daño es expresado en una escala normalizada ($0 < d < 1$) que representa el porcentaje de daño que sufre la edificación, por ejemplo valores entre (0.8 -1.0) son equivalentes al colapso de la edificación.

- **Método Empírico** (Cardona , 1989).

Plantea un método empírico para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones, pre-evento, de una manera rápida y preliminar. Puede ser desarrollado por personas no versadas en el tema de la ingeniería sísmica ó por ingenieros con poca experiencia, llevando a cabo un análisis cualitativo de las características de la construcción, tales como la calidad y estado de la misma, configuración y forma, tipo de estructura, características del suelo y de la fundación, estabilidad de componentes no estructurales. Estos aspectos se califican subjetivamente como Vulnerabilidad Alta (A), Media (M) y Baja (B), con un criterio riguroso y conservador (ver tabla 9).

Tabla 9. Matriz de calificación de la vulnerabilidad método de Cardona.

ASPECTO	VULNERABILIDAD			VALOR
	A	M	B	
1. Calidad y Estado de la Construcción.	50	25	5	
2. Configuración y forma de la edificación.	60	30	5	
3. Tipo de Estructura	80	40	15	
4. Características del Suelo y la Cimentación	60	30	10	
5. Estabilidad de componentes no estructurales	50	25	5	

Una vez calificado cada aspecto se suman los valores respectivos para obtener un resultado o parámetro global. Sí el parámetro supera el valor de 150 la edificación será altamente vulnerable, entre 90 y 150 será considerada, en general, vulnerable y por debajo de 90 será considerada, en general, segura.

- **Método de Velasco & Tassios** (INGEOMINAS, 1992).

Este método es propuesto y aplicado por *Velasco & Tassios* para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la ciudad de Popayán, en el marco del proyecto *Microzonificación sismogeotécnica de Popayán* (INGEOMINAS (1992), el cual determina la vulnerabilidad sísmica local de las edificaciones y se evalúa el riesgo sísmico relativo.

Según estos autores a pesar del desarrollo de la construcción en concreto reforzado a partir de la década de 1950, en muchas de las ciudades colombianas todavía existen núcleos importantes de edificaciones construidas en la colonia y finales del siglo XIX, con el mismo sistema estructural importado por los españoles.

A. Determinación de la vulnerabilidad

En primera instancia, consiste en clasificar las edificaciones dentro de uno de los tipos que se muestran a continuación:

- **TIPO 1.** Arquitectura clásica española de los siglos XVIII y XIX con intervenciones o sin ellas, cualquiera que sea el año de su construcción, que hayan usado como elementos de construcción mampostería de adobe, tapia pisada o ladrillo cocido ligado con mortero de cal, o cualquier combinación de estos elementos con entresijos y techos cuyo material estructural fundamental es la madera.

- **TIPO 2.** Edificaciones cuyos principales materiales de construcción son el ladrillo cocido y el mortero de cemento, con o sin elementos de concreto reforzado.
- **TIPO 3.** Edificios con estructuras aporticadas de concreto reforzado en los cuales las paredes operan únicamente como elementos divisorios (tabiques).

Cada uno de los tres tipos de edificios se ha clasificado según los elementos que intervienen en su estabilidad: la edad de la construcción, el estado de conservación y los elementos estructurales. A cada elemento se le asigna un valor que se denomina “factor de ponderación, (**fpi**)”, que siendo una fracción de unidad representa la importancia de ese elemento dentro de la estructuración global. La suma de esos factores debe ser igual a 1. Esta información se recolecta en un formulario para cada uno de los tres tipos, y diligencia para cada edificio o sector estructuralmente independiente de la edificación que se analice.

Luego se calcula la vulnerabilidad local (**v**) de los elementos mencionados que reciben una calificación de 1 a 100 según sus características, el menor valor indica que el elemento analizado cumple con las exigencias de la buena práctica ingenieril y el mayor señala el mas alto grado de vulnerabilidad. Estimados los valores de (**fpi**) y (**v**) se procede a calcular un índice de vulnerabilidad (**V**) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V = f_{pi} \times v_i$$

Donde:

V = Índice de vulnerabilidad

f_{pi} = Factor de ponderación

v_i = Vulnerabilidad local

n = Número de elementos que intervienen en la vulnerabilidad

Tabla 10. Matriz de calificación de índices de vulnerabilidad
método *Velasco & Tassios*.

Valores de V	Calificación
1 a 33	Seguro
34 a 66	Dudoso, requiere estudio mas detallado
67 a 100	Riesgoso, requiere intervención

Fuente: Tomado de *Velasco & Tassios* en *INGEOMINAS*, (1992)

B. Determinación del riesgo sísmico relativo.

Según *Velasco & Tassios* en *INGEOMINAS* (1992) esta es una evaluación aproximada de primer nivel y la estimación del riesgo sísmico relativo (RSR) se determina a partir de la siguiente expresión:

$$RSR = I \times V \times H$$

donde:

“I” corresponde a un *factor de importancia* para un edificio específico

(importancia estructural, funcional, social).

“V” es el “*índice de Vulnerabilidad*”, estimado a partir de factores de ponderación y calificaciones.

“H” es un estimativo del nivel del evento sísmico, considerado con una probabilidad dada de recurrencia dentro de la vida de los edificios evaluados.

En el contexto de estudios de vulnerabilidad, “I” debe incluir todos los costos de perdidas de propiedades, producción, funcionamiento y vidas humanas, así como los “costos” históricos equivalentes. Para Popayán Velasco & Tassios (1992), sugirieron los siguientes valores:

Tabla 11. Factor de importancia de las edificaciones

Tipo de Edificación	I
Casas pequeñas	1.0
Edificios multifamiliares y comercios pequeños	1.5
Edificios importantes de gobierno	2.0
Edificios con concentración de personas (escuelas, teatros, estadios, entidades para la atención de desastres)	2.5
Centros médicos asistenciales	3

Fuente: Tomado de Velasco & Tassios, en INGEOMINAS (1992)

Los autores del método plantean la siguiente relación para el cálculo de H.

$$H = A^{i - i_b}$$

Donde:

A = Ampliación de la vulnerabilidad de un grado de intensidad en la escala de MM

i = Valor numérico igual al de la intensidad esperada en la escala MM

ib = valor numérico de la intensidad tomada como base de comparación

Se estima que $A = 1.26$ podría ser una aproximación inicial para determinar el valor de H.

- **Método de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (A/S, 2001)**

La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS (2001), plantea un método para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas en mampostería, que consiste en la calificación de seis componentes: aspectos geométricos, constructivos, estructurales, cimentación, suelos y entorno.

Según este método para que una vivienda califique como de vulnerabilidad sísmica intermedia o alta es suficiente que presente deficiencias en cualquiera de los aspectos mencionados. Cada aspecto investigado se califica mediante unos criterios muy sencillos a partir de una inspección visual, comparándolos con patrones generales. La calificación se realiza en tres niveles, a los cuales se les asigna un color: vulnerabilidad baja (verde), vulnerabilidad media (naranja) y vulnerabilidad alta (rojo). La matriz de calificación se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Matriz de calificación de la vulnerabilidad método AIS.

COMPONENTE	VULNERABILIDAD		
	BAJA	MEDIA	ALTA
ASPECTOS GEOMÉTRICOS			
• Irregularidades en planta de la edificación			
• Cantidad de muros en las dos direcciones			
• Irregularidad en altura			
ASPECTOS CONSTRUCTIVOS			
• Calidad de las juntas de pega del mortero			
• Tipo y disposición de las unidades de mampostería			
• Calidad de las juntas de los materiales			
ASPECTOS ESTRUCTURALES			
• Muros confinados y reforzados			
• Detalles de columnas y vigas de confinamiento			
• Vigas de amarre o corona			
• Características de las aberturas			
• Entrepiso			
• Amarre de cubiertas			
CIMENTACIÓN			
SUELOS			
ENTORNO			
Calificación Global			

Fuente: AIS, 2001

- **Método Argentino** (*Fernández, 1987*)

Es una propuesta experimental para la evaluación de la vulnerabilidad de sistemas en la zona sísmica del Gran Mendoza, Argentina, desarrollado por la “Unidad de riesgo sísmico y desarrollo local”.

El método toma una serie de variables sencillas a las cuales se les asignan valores para obtener la escala de riesgo. Se consideran las características globales de la construcción: el número de pisos, materiales de techos y

muros, antigüedad de la construcción, estructuración, suelo y colindancia. Este método incorpora un desarrollo computacional que arroja resultados estadísticos y gráficos, representados en mapas a escala urbana. Las calificaciones asignadas se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Calificación de la vulnerabilidad del método argentino.

Variable	Intervalo	Valor
I Número de pisos	1	1
	2	2
	3 a 5	3
	6 ó más	4
II Material de muros	Ladrillo	1
	Adobe	3
	Dudoso	4
III Material de techos	H1A1	4
	Otros	3
	Caña y barro	5
IV Antigüedad	Hasta 10 años	1
	De 11 a 30 años	3
	De 31 a 50 años	2
	Más de 50 años	4
V Estructuración	Sismo resistente	1
	Mixta	3
	No sismo-resistente	5
VI Suelo	Firme	2
	Intermedio	3
	Blando	4
VI Colindancia	x0 Nulo	0
	x1 Bajo	1
	x2 Moderado	2
	x3 alto	3
	x4 Muy alto	4
Calificación		
de 3 hasta 16	RIESGO BAJO-RB	1
de 17 a 23	RIESGO MODERADO-RM	2
24 ó mas	RIESGO ALTO- RA	3

- **Método Italiano ISTC** (*Giuliano et., al, 2000*)

Fue desarrollado por el "Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni" (I.S.T.C) y la "Università degli Studi di Padova" y adaptado para el estudio de *Vulnerabilidad Sísmica de Viviendas de Adobe en La Zona de Coelemu (8ª región de Chile)*. Consiste en el análisis sísmico de grupos de edificios con estructura soportada por muros de mampostería de tipologías y características constructivas similares. Su aplicación considera edificios aislados en mampostería no reforzada de regulares dimensiones (2 a 3 pisos), edificios contiguos o conjuntos de edificios.

La capacidad resistente del edificio se evalúa por medio de dos parámetros (índices I_1 e I_2). Un tercer índice, I_3 , es utilizado para determinar, en conjunto con los ya calculados, la vulnerabilidad de la edificación (o grupo de edificios), con base en la función de vulnerabilidad, (**Vu**), propuesta por el I.S.T.C. , clasificando la edificación dentro de las cinco clases de vulnerabilidad definidas: muy grande, grande, media, pequeña, muy pequeña (ver tabla 14).

Tabla 14. Matriz de calificación de vulnerabilidad método ISTC.

Num	Parámetro	Peso I.S.T.C (pi)
1	Calidad del sistema resistente	0.15
2	Posición del edificio y cimentación	0.75
3	Presencia de diafragmas horizontales	0.5
4	Configuración en elevación	0.5
5	Tipo de techumbre	0.5
6	Elementos no estructurales	0.25
7	Estado de conservación	0.5

Fuente: Giuliano et., al, 2000

- **Método japonés** (*Hirosawa, 1992*).

Es utilizado para la evaluación de edificaciones de hormigón armado de mediana y baja altura, construidas mediante métodos convencionales. Se evalúan la estructura, la forma del edificio y la peligrosidad de los elementos no estructurales. La estimación del riesgo sísmico se realiza por medio del cálculo de un índice sísmico (**Is**), que representa el comportamiento global de un entrepiso.

La evaluación de la seguridad se hace por un método de tamizado en tres pasos sucesivos, para obtener como resultado dos índices que miden la seguridad sísmica de la construcción.

Is = *Índice sísmico de la estructura.*

In = *Índice sísmico de los elementos no estructurales.*

El índice sísmico de la estructura **Is**, es el producto de cuatro subíndices que son calculados individualmente:

Eo está condicionado por la resistencia última de los elementos estructurales de la edificación, el tipo de mecanismo de falla y la ductilidad del sistema; **G** tiene en cuenta la intensidad de los movimientos del terreno; **Sd** representa el efecto que el diseño estructural tiene en el comportamiento sísmico de la estructura a través de factores como la distribución de masas y de rigideces y, por último, **T** califica los efectos de deterioro y defectos estructurales como grietas y deflexiones. De esta manera el **Is** es el producto de los subíndices anteriores, que se expresan en la siguiente ecuación:

$$I_s = (E_o) \times (G) \times (S_d) \times (T)$$

Donde:

E_o = Subíndice sísmico de comportamiento estructural.

G = Subíndice sísmico de movimiento del terreno.

S_d = Subíndice sísmico de concepción estructural.

T = Subíndice sísmico de deterioro con el tiempo.

La evaluación de la seguridad se realiza a partir de los resultados obtenidos para **I_s** e **I_n**, teniendo en cuenta parámetros como la importancia, edad y uso de la edificación.

- **Método NAVFAC** (*Matzamura et. al (1988), en Cardona, 1990*).

Desarrollado por G. Matzamura, J. Nicoletti y S. Freeman con el nombre de "Seismic Design Guidelines for Up-Grading Existing Buildings". Es aplicable en cualquier tipo de estructura. Evalúa un índice que mide la relación de daños que un sismo determinado puede causar en una estructura. La capacidad de la estructura se determina por medio del coeficiente de cortante basal resistente (**C_b**), el desplazamiento en el nivel más alto de la estructura (**S**) y el periodo fundamental (**T**), con los cuales se calcula el índice global de daño (**I**). Su principal problema es que no toma en cuenta la falla prematura de los elementos más débiles (*Cardona, 1990*).

Procedimiento básico:

1. Recolección de información de la estructura.
2. Inspección detallada de la estructura, in-situ.
3. Determinación de los espectros de respuesta elástica.
4. Comparación de la capacidad de la estructura con la demanda del sitio (D/C).
5. Cálculo del índice de daño (I)
6. Cálculo del índice global de daño (Ig)

Los resultados de la evaluación se presentan en una gráfica de capacidad/demanda, que se superpone a las curvas de demanda última. El índice global de daños de la estructura se representa por la siguiente relación:

$$I=(D/C)\times 100 \%$$

Donde:

I = Índice de daños.

(D/C) = Relación de demanda sobre capacidad resistente

Para D = 0, no existen daños por el contrario, para D=C el índice de daños es del 100 %.

El índice global de daños (**Ig**) se determina como las dos terceras partes del índice de daño (**I**) en la dirección mas crítica. Si $I_g \geq 60 \%$ se debe proceder a realizar una evaluación más detallada de la estructura.

- **Método venezolano** (*Rivera et., al, en Cardona, 1990*) .

Desarrollado por I. Rivera de U, D. Grisolia de C. y R. Sarmiento de la Universidad de los Andes de Mérida, Venezuela, este es aplicable a edificios bajos de hormigón armado ó Mampostería. Evalúa cortes por separado y luego halla un índice global de entrepiso (*Cardona, 1990*).

Procedimiento básico:

1. Revisión detallada de documentos existentes de la edificación, planos memorias de diseño, etc.
2. Levantamiento de dimensiones generales del edificio, estructura y especificaciones de los elementos resistentes a fuerzas laterales.
3. Inspección detallada, in-situ, del edificio examinando cuidadosamente: el sistema estructural, deflexiones de losas y/o vigas, agrietamientos, deterioro de la estructura, conexiones y apoyos entre elementos, etc.
4. Revisión de agrietamiento y condición general de paredes, arriostramiento, presencia de columnas cortas.
5. Identificación de elementos no estructurales susceptibles a caerse durante un movimiento sísmico.
6. Revisión de salidas de emergencia y estado de los sistemas contra incendios.
7. Determinación de las fuerzas sísmicas cortantes actuantes (V_u)
8. Determinación de las fuerzas cortantes resistentes del entrepiso (V_{ur}).
9. Determinación de la relación $E = V_{ur}/V_u$.
10. Cálculo del índice sísmico (I_s)

$$I_s = E.D.T$$

Donde:

I_s = Índice sísmico

D = Índice de irregularidad en planta y en elevación de la edificación.

T = Índice de las condiciones de deterioro en el tiempo de la edificación.

- **Método mexicano** (*Iglesias, 1989, en Cardona, 1990*).

Desarrollado por J. Iglesias de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Este procedimiento evalúa la capacidad sísmica de edificios en hormigón armado de mediana altura. Consiste en evaluar progresivamente una edificación con tres niveles de precisión hasta alcanzar un nivel de seguridad adecuado o demostrar la necesidad de reforzar el edificio.

El primer nivel es una inspección visual de la estructura, el segundo consiste en una evaluación aproximada de la capacidad sísmica y el tercero consiste en la evaluación detallada de acuerdo con las normas de construcción.

Procedimiento básico:

1. Inspección visual de la edificación (se recolecta información sobre su estructuración, comportamiento de la cimentación, ubicación y deterioro). Se identifican características asociadas al mal comportamiento sísmico y se clasifica su gravedad.

2. Para la evaluación se asigna una calificación (bajo, intermedio, alto) a cinco índices que representan los aspectos mas relevantes que afectan la seguridad sísmica de una edificación.

- Estructuración en planta.
- Estructuración en elevación.
- Cimentación.
- Ubicación y su relación con estructuras vecinas.
- Deterioro.

El método indica qué tipos de calificación deben asignarse de acuerdo con una serie de criterios definidos. Cada calificación es equivalente a un puntaje (alto = 2, medio = 1, bajo = 0). La sumatoria de los índices se compara con valores estipulados para dos tipos de estructuras dependiendo del nivel de importancia.

- **Método PERCAL** (*Jaramillo & Ortega, 1994*).

Los autores describen la vulnerabilidad de una estructura en términos de la aceleración basal resistente última, la aceleración basal resistente elástica, el periodo fundamental de vibración de la estructura y la función de daños. Los diferentes tipos de estructuras son definidos en función de unas variables, consideradas como influyentes en los parámetros que describen la vulnerabilidad de una construcción. Éstas son: el estrato socio económico, el número de pisos, el tipo de cubierta (liviano, teja de barro y losa de concreto), la edad de la construcción y el uso (residencial, comercial e industrial).

La vulnerabilidad sísmica de viviendas de uno y dos pisos en mampostería se calcula a partir de la aceleración basal resistente última, determinada por la longitud de muros de mampostería en la dirección más débil del primer piso, la resistencia al cortante de los muros y por el peso de la construcción. Éste resultado se corrige con factores que tienen en cuenta la calidad de la construcción según el estrato, la edad y el uso.

Para el caso de edificaciones de tres y mas pisos la aceleración basal resistente última está determinada por el coeficiente sísmico de diseño exigido o de más utilización en la época de construcción, valor que se corrige con factores como: corrección de resistencia por estrato socioeconómico, corrección del periodo de diseño y corrección por ductilidad. Todos estos valores son introducidos a un programa de computo desarrollado por los autores, denominado PERCAL con el cual se calculan las pérdidas materiales y de vidas para diversos niveles de amenaza sísmica.

- **Método Hurtado** (*Hurtado*, 1990 en *Campos*, 1992).

Este procedimiento evalúa la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas en mampostería confinada y no confinada, generalmente de uno y dos pisos, mediante el cálculo de la resistencia sísmica al cortante y la ductilidad en la dirección más desfavorable, teniendo en cuenta la longitud y espesor de sus muros, al igual que el peso de la vivienda. Esta metodología permite categorizar el tipo de daños que puede presentar una edificación sometida a diversos valores de aceleración pico del terreno (*Campos*, 1992).

El procedimiento es el siguiente:

1. Cálculo de las longitudes de los muros resistentes del primer piso de la vivienda.
2. Cálculo de la resistencia a cortante menos favorable (**VR**), considerando la menor longitud de muros en una dirección en el primer piso de la edificación. La resistencia al cortante se calcula como:

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

Donde:

VR: cortante de los muros.

L: longitud de muros en cada una de las dos direcciones principales de la edificación.

e: espesor de los muros

v: valor de la resistencia a cortante de los muros (1.50 Kg/cm² para mampostería confinada y 0.75 Kg/cm² para mampostería no confinada). Según los ensayos de laboratorio para muros de mampostería de la universidad de los Andes en 1990 (*Campos*, 1992).

3. Cálculo del peso de la edificación que es resistido por la estructura (**W**), multiplicando el área por el peso por m².

4. Cálculo del coeficiente **(CSR)**, es decir, el porcentaje del peso de la edificación que es resistido por la estructura, como cortante horizontal en la dirección más desfavorable. Esto resulta de dividir la resistencia a cortante menos favorable VR, por el peso promedio de la vivienda según la siguiente expresión:

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

5. Cálculo del coeficiente exigido a la estructura CSE a partir del espectro de respuesta escogido, de acuerdo con la NSR-98 estipulado en el Título A.
6. Cálculo de la demanda de ductilidad **(DD)**, como la relación entre el coeficiente sísmico exigido **(CSE)** y el coeficiente sísmico resistente **(CSR)**, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$(DD) = (CSE) / (CSR)$$

Se toma como valor de referencia la ductilidad disponible (capacidad de ductilidad) con un valor de 1.0 para MNC y un valor de 2.0 para la MC

Por último teniendo en cuenta los resultados anteriores, se puede clasificar y dibujar los daños de una manera cualitativa en las categorías de daño que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 15. Matriz de categoría de daños método de Hurtado

CATEGORÍA Y ESTADO DE DAÑOS	DEMANDA DE DUCTILIDAD
1. Ninguno	$DD < 0.50 CD$
2. Menores	$0.50 CD < DD < 0.75 CD$
3. Moderados	$0.75 CD < DD < 1.00 CD$
4. Mayores	$1.00 CD < DD < 1.50 CD$
5. Totales	$1.50 CD < DD < 2.00 CD$
6. Colapso	$2.00 CD < DD$

Fuente: Hurtado, 1990 en Campos (1992).

Los efectos en la estructura para cada categoría de daño son:

1. Sin daños.
2. Daños menores en elementos arquitectónicos
3. Daños generalizados en los elementos arquitectónicos y daños en los elementos estructurales.
4. Daños generalizados en los elementos estructurales y arquitectónicos.
5. Daños no reparables en la estructura, por lo tanto la edificación debe ser demolida y reemplazada.
6. Edificación parcial o totalmente colapsada por inestabilidad.

2. Métodos con base en códigos de construcción.

Estos métodos utilizan los mismos criterios para el diseño de nuevas edificaciones y parten de los procedimientos recomendados por los códigos de construcción. En consecuencia para el caso de una edificación existente

El procedimiento consiste en evaluar las fuerzas laterales que representan la intensidad sísmica esperada para un determinado sitio, comparándolas con la capacidad existente en la estructura. Para ello se utilizan métodos simplificados, como el de la fuerza horizontal equivalente o el análisis modal con espectros de respuesta. Cuando se requiere de parámetros como el amortiguamiento o la ductilidad de la estructura, estos se deducen empíricamente (*Caicedo et al, 1994*).

La literatura en lo referente a este tipo de métodos en el ámbito mundial es muy extensa, sin embargo, los métodos mas comentados siguen siendo los desarrollados por el ATC (Applied Technology Council) de los Estados Unidos). (*Caicedo et., al, 1994; Cardona, 1990*)

- **Métodos del ATC** (Applied Technology Council *en Caicedo et., al, 1994; Cardona, 1990*) .

La metodología ATC-13 (1985), en *Caicedo et al, 1994; Cardona (1990)* propone una evaluación con base en el *factor de capacidad sísmica (R)*, que es igual a la capacidad lateral existente en un edificio dividida entre la correspondiente capacidad requerida para una nueva construcción. Dependiendo del R, el edificio es catalogado como adecuado o inadecuado.

La metodología ATC-14 (1987), en *Caicedo et al, 1994; Cardona, 1990*) clasifica la edificación analizada dentro de una de las 15 tipologías estructurales establecidas en el método y evalúa el riesgo sísmico potencial de cualquier tipo de estructura.

Hace énfasis en la determinación de los "*puntos débiles del edificio*" con base en la observación de daños en edificios similares ocurridos en eventos sísmicos anteriores.

Cada tipo estructural presenta una descripción de sus características particulares y de su comportamiento sísmico observado en pasados terremotos, para estructuras similares. Luego, mediante una serie de preguntas de falso o verdadero referentes a los elementos estructurales y no estructurales se determinan las posibles fallas que esta puede presentar en el momento de un sismo. Si después de la evaluación no se detectan fallas, se considera que el edificio tiene un nivel aceptable para salvar la vida de sus ocupantes; en caso contrario, se deben evaluar para los elementos estructurales y no estructurales una serie de factores de capacidad/demanda (C/D) y compararlos con unos niveles mínimos establecidos empíricamente.

El método identifica, inicialmente, los edificios que significan un riesgo para la vida humana durante un movimiento sísmico, en términos de posibilidad de colapso total del edificio; posibilidad de colapso parcial de elementos del edificio; elementos del edificio susceptibles a caerse o a fallar.; obstaculización de salidas del edificio, impidiendo la evacuación o el rescate.

El método evalúa los esfuerzos cortantes actuantes, los desplazamientos relativos en el entrepiso y ciertas características del edificio.

Procedimiento básico:

1. Recolección de datos.
2. Inspección detallada in-situ. Para tener una descripción de la estructura el método utiliza una "lista de chequeo" en la cual se responde verdadero o falso. Si todas las respuesta son verdaderas, la estructura no tiene problemas de comportamiento. Si alguna de las respuesta es falsa se hace necesario investigar el elemento que presenta problemas.
3. Descripción del modelo estructural del edificio.
4. Cálculo aproximado de los esfuerzos de corte y de los desplazamientos relativos para estructuras de hormigón armado. Esfuerzo axial y desplazamientos en elementos de acero. Verificación de esfuerzos de corte en muros estructurales.
5. Comparación de la relación Capacidad /demanda (C/D) con los valores especificados en la norma ATC (ATC-14 ,1987, en *Caicedo et al*, 1994).
6. Estimación de la deriva.

Se realiza una revisión de los detalles especiales con base en las respuestas dadas en la "lista de chequeo"

El método ATC-21 (1988), en *Caicedo et al* (1994); *Cardona* (1990); *Construweb* (2001) revisión por filtro de peligros sísmicos potenciales en edificaciones existentes (Rapids Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards), se fundamenta simplemente en darle una calificación inicial a la edificación y, a medida que se avanza en la revisión, se van filtrando las características estructurales de la edificación, a la vez que se le van restando o sumando puntos a la calificación inicial.

El procedimiento identifica, en primera instancia, el sistema estructural resistente, así como los materiales en que esta construida la edificación. El puntaje asignado se va sumando o restando a la calificación inicial identificando de factores como la altura, el uso, el año de construcción, el deterioro, irregularidades geométricas tanto en planta como en altura, y pisos flexibles, entre otros.

- **Método NSR-98** (A/S, 1998).

La Norma de Diseño y Construcción Sismo-Resistente Colombiana NSR - 98 (Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998), establece en el "**Titulo A - requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente**", del Capítulo A.10, los criterios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones construidas antes de su vigencia. Este procedimiento tiene como finalidad comprobar si el comportamiento estructural de la edificación en su estado actual, sometida a sollicitaciones sísmicas, satisface los requerimientos mínimos establecidos en la norma.

Procedimiento básico:

El procedimiento consiste en la identificación de una serie de parámetros como el sistema estructural con que fue construida originalmente, el tipo de cimentación y las propiedades de los materiales utilizados, entre otros. Con toda la información obtenida de planos, si los hay, o de los levantamientos y exploraciones realizadas, se construye el modelo estructural de la edificación y se analiza matemáticamente su comportamiento dinámico, obteniendo como resultado las demandas de resistencia sísmica para los esfuerzos a que está sometida. Los resultados se comparan con los valores establecidos en la NSR-98, determinando las zonas o puntos mas vulnerables de la edificación que pueden representar riesgo y que necesitan ser reforzados.

A continuación se resumen los pasos necesarios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes prescrito en la NSR-98:

1. Recolección de información de la edificación (memorias, planos, etc.).
2. Inspección visual de la edificación y recolección de información.
3. Levantamiento de planos de la edificación, si no existen.
4. Identificación del sistema estructural.
5. Exploración y estudios de suelos.
6. Dimensiones de elementos estructurales y localización de refuerzos
7. Verificación de resistencia del hormigón.
8. Elaboración de un modelo estructural actual, el cual se analiza para las

fuerzas sísmicas que el sismo de diseño imponga, en combinación con las fuerzas de gravedad, mayoradas de acuerdo con las combinaciones de carga.

9. Análisis matricial tridimensional (análisis elástico lineal).
10. Cálculo de demandas obtenidas y capacidades actuales calculadas en los elementos.
11. Determinación de los índices de sobre esfuerzo en los elementos y de las estructuras, para determinar puntos o zonas vulnerables.
12. Determinación de índices de flexibilidad de pisos y estructuras.

Finalmente, la vulnerabilidad se define como los inversos de los índices de sobre esfuerzos y flexibilidad. Los resultados obtenidos se comparan con lo que la norma exige para una edificación nueva.

- **Métodos FEMA** (Construweb, 2001).

Los metodos FEMA son procedimientos desarrollados por el "Building Seismic Safety Council" de los EEUU. Plantean, para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes, una serie de interrogantes que sirven para determinar las zonas o puntos vulnerables de una edificación. Para el análisis se utilizan procedimientos simples, calificando mediante variables lógicas, como falso o verdadero, aspectos estructurales, pórticos, diafragmas, conexiones y amenazas geológicas, entre otras, comparando los requisitos con los que se diseñó y construyó la edificación con los requerimientos de diseño sísmico actuales.

Estos también están diseñados para identificar de una forma más detallada los elementos estructurales, como vigas y columnas, que presenten deficiencias en cuanto a su capacidad o resistencia sísmica, definiendo diferentes procedimientos y criterios de diseño para alcanzar niveles de desempeño sísmico, entre los que se encuentran el nivel operacional, el nivel de protección de la vida, el nivel de prevención de colapso, el nivel de ocupación inmediata.

La escogencia de un determinado nivel depende del desempeño o comportamiento esperado de la edificación, durante y después de un movimiento telúrico, de cuanto daño es permitido, al igual que pérdidas económicas y traumatismo o interrupción de las actividades cotidianas de los ocupantes de la edificación. Además, este método plantea una metodología para desarrollar los procedimientos de rehabilitación o refuerzo.

5.2.3 Problemas asociados con los métodos subjetivos

Según *Caicedo et al (1994)*, los métodos subjetivos no permiten una evaluación precisa de la vulnerabilidad de las edificaciones. A pesar de esto, llegan a ser la única herramienta disponible en los casos para los cuales la modelización matemática, por medio de métodos analíticos, es muy costosa, compleja o involucra factores cuyo comportamiento es difícil de predecir.

La opinión de expertos y una base de datos empírica de daños observados en edificaciones existentes en terremotos pasados, es un factor fundamental para la aplicación de este tipo de metodologías.

En la mayoría de los casos la opinión subjetiva del experto, 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, comúnmente, 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 (*Caicedo et. al, 1994*),

Los métodos que utilizan matrices de probabilidad de daño son muy apropiados, por que la definición de esas matrices es generalmente sencilla y el cálculo del riesgo específico se simplifica enormemente. Sin embargo, por otro lado, obligan a adoptar tipologías estructurales muy generales, las cuales son difícilmente adaptables a regiones con tecnologías constructivas distintas (*Caicedo et. al, 1994*),

Los métodos fundamentados en los códigos de construcción, además de no dar una estimación del daño, son elaborados con criterios y normas específicas adoptadas por un código de construcción en particular, lo que dificulta su aplicabilidad en otras regiones.

6. METODOLOGÍA DESARROLLADA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES

6.1 GENERALIDADES

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica o el grado de daño de una edificación debe llevarse a cabo un riguroso estudio de su comportamiento sísmico. En este sentido y de acuerdo con *Cardona* (1989), para este análisis se requiere de un especialista, el cual necesita información detallada de planos estructurales y arquitectónicos, además de estudios que se hallan realizado para la construcción ó remodelación.

En el caso particular de las edificaciones de uno y dos pisos de construcción popular, la mayoría no cuenta con información referente a su diseño y construcción, como planos ó estudios técnicos que permitan servir de insumo para su evaluación. Por tal motivo es necesario considerar la posibilidad de adelantar evaluaciones que no siendo tan rigurosas, permitan realizar una valoración cualitativa de la vulnerabilidad sísmica de una o un grupo de edificaciones.

De todas las formas de hacer una evaluación, la inspección visual es una de las más rápidas, sencillas y económicas. Aún para saber si es necesario un análisis estructural o un modelo matemático, se requiere de una inspección visual para diagnosticar acciones futuras, ésta también contribuye a conocer de una manera global las edificaciones prioritarias, para la toma de decisiones relacionadas con la intervención de la vulnerabilidad.

A continuación se presenta la metodología desarrollada por el autor de este trabajo, para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de mampostería de uno y dos pisos del barrio San antonio.

6.2 DETERMINACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Debido a que no existe una metodología estándar para la evaluación cualitativa de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones que sea aplicable en su totalidad en cualquier región, es necesario adaptar o proponer metodologías que respondan a las condiciones particulares de las edificaciones en su contexto local. En este sentido, el autor del presente desarrolló una metodología que tiene en cuenta las características constructivas, arquitectónicas y estructurales de las edificaciones de la zona estudiada, que permite realizar un diagnóstico inicial de la vulnerabilidad, hacer un análisis global y particular, tener un conocimiento integral de la zona, además de generar mapas de escenarios de vulnerabilidad y daño sísmico.

Para determinar la metodología apropiada a utilizar en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de uno y dos pisos en la zona de estudio, se analizaron los métodos presentados en el capítulo anterior. Se descartó la posibilidad de realizar el estudio por "*Métodos Analíticos*" de la "*Categoría de Vulnerabilidad Calculada*" debido a que por lo general este tipo de evaluaciones han sido concebidas para ser aplicadas a edificios de concreto reforzado (Caicedo et.,al, 1994).

Por lo tanto se determinó que la metodología apropiada (ver figura 112), es la perteneciente a la "**Categoría de vulnerabilidad observada**", constituida por los "**Métodos que evalúan la capacidad**", mediante un "**Sistema de calificación**", debido a que estos permiten identificar y calificar de una forma rápida, mediante una inspección visual y una evaluación cualitativa, el grado de vulnerabilidad sísmica de un conjunto de edificaciones de diversas tipologías constructivas, de acuerdo con el nivel de detalle que se requiera y los resultados esperados.

No se consideró la utilización de los "**Métodos que Predicen el Daño**" de la "Categoría de Vulnerabilidad Observada", debido a que no se cuenta con información y análisis estadísticos de daños observados en terremotos pasados en las edificaciones de ciudad, ni mucho menos en la zona de estudio, que permitan construir funciones o matrices de vulnerabilidad.

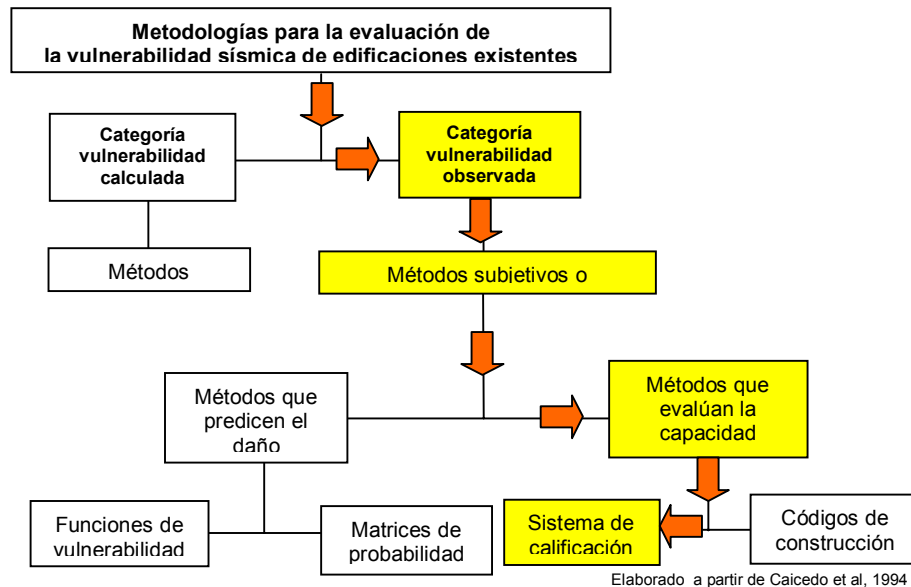


Figura 112. Diagrama de determinación de la metodología.

Según *Meyer* (1990), la ciudad moderna no ha sufrido desastres sísmicos de magnitud cuyos efectos permitieran el análisis de la vulnerabilidad por métodos empíricos, sin embargo, para establecer el nivel de pérdidas probables en aquellos eventos sísmicos, relativamente más frecuentes, que generen intensidades del orden de VI y VII, el Observatorio Sismológico del Sur Occidente - OSSO ha realizado análisis macrosísmicos de terremotos de esas características que ocurrieron en los últimos 40 años.

6.3 PROPUESTA METODOLÓGICA

6.3.1 Descripción de la metodología.

Teniendo como base los criterios establecidos en el marco teórico y la determinación del tipo de metodología definida en el numeral anterior, a continuación se presenta la propuesta metodológica resultado de la investigación realizada denominada ***metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en mampostería de uno y dos pisos***, .

Con base en los fundamentos teóricos de la sismo resistencia y en el estudio de las causas de falla sísmica de edificaciones por terremotos pasados, se determinaron una serie de parámetros denominados ***Indicadores de Vulnerabilidad Sísmica***, con los cuales se determina el grado de vulnerabilidad por indicador, además de la vulnerabilidad física global de la edificación obtenida a partir la suma de todos los indicadores.

- **Grado de vulnerabilidad sísmica por indicador.**

Cada uno de los indicadores de vulnerabilidad, recibe una calificación que puede ser 50, 25 ó 5, correspondiendo, el primer y máximo valor, a una condición desfavorable como **Vulnerabilidad Alta**, el segundo a una condición intermedia como **Vulnerabilidad Moderada** y el tercero a una condición favorable como **Vulnerabilidad Baja**, de acuerdo con los criterios de calificación que se definen mas adelante. Con estos resultados es posible construir **escenarios de vulnerabilidad sísmica** por indicador.

- **Grado de vulnerabilidad física global de la edificación.**

Una vez calificado cada indicador, se procede a sumar los valores respectivos para obtener el grado de vulnerabilidad física global cualitativa de la edificación de acuerdo con la siguiente expresión.

$$GV = \sum Iv$$

Donde:

GV = Grado de vulnerabilidad sísmica

Iv = Indicador de vulnerabilidad

Si el parámetro supera el valor de 150 la edificación calificará con **Vulnerabilidad Baja**, entre 150 y 375 calificará con **Vulnerabilidad Moderada** y por último si está por encima de 375, calificará con **Vulnerabilidad Alta**, la máxima calificación estimada es de 750. Con estos

resultados se pueden construir posibles **escenarios de vulnerabilidad sísmica** de manera global.

- **Matriz de calificación.**

La matriz para la calificación de la vulnerabilidad sísmica, esta compuesta por ocho indicadores de vulnerabilidad básicos, estos son: época de construcción, sistema estructural, geometría, peso de la edificación, rigidez, elementos no estructurales, suelo y cimentación, y el estado de conservación. Dentro de estos indicadores se consideran unos **sub-indicadores**, que pueden ser considerados en un menor o mayor número dependiendo el grado de detalle de la evaluación que se quiera realizar.

Se puede decir que entre mayor sea el número de indicadores a utilizar en la evaluación, se tendrá un conocimiento mas detallado de las condiciones de vulnerabilidad de la edificación. Para objeto de este trabajo se consideraron los ocho indicadores básicos mencionados anteriormente, de los cuales cuatro de ellos presentan sub-indicadores. Estos se muestran la tabla siguiente.

Tabla 16. Matriz de calificación de la vulnerabilidad método propuesto.

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

*** No tienen calificación debido a que hay solo dos condiciones de decisión: vulnerabilidad alta (50) ó baja (5)

Tabla 17. Matriz de calificación de vulnerabilidad física-global o de conjunto

Indicador global de Vulnerabilidad Sísmica	
Grado de vulnerabilidad baja	> =150
Grado de vulnerabilidad moderada	>150 y <= 375
Grado de vulnerabilidad alto	>375

6.3.2 Descripción de los Indicadores de vulnerabilidad sísmica

Se considera que los parámetros propuestos para la evaluación de la vulnerabilidad presentados en este trabajo, inciden de manera importante en el comportamiento sísmico de una edificación.

1. Época de construcción (técnicas y normas constructivas).

Mediante este indicador se pueden identificar las características constructivas, estilos arquitectónicos, técnicas y prácticas constructivas, nivel de diseño, normas y materiales utilizados en una determinada época. Igualmente, interesa este dato para compararlo con la fecha del código de construcción vigente.

Los parámetros utilizados para calificar este indicador, tienen en cuenta tres periodos:

Edificaciones construidas antes de 1985

Este periodo reúne las edificaciones construidas antes de la vigencia de la ley 1400 del 23 de junio de 1983, Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, CCCSR-84. Este parámetro recibe la calificación de 50, que corresponde a un grado de **vulnerabilidad alta** debido a:

- Antigüedad de las construcciones cuyos materiales posiblemente han perdido sus propiedades resistentes.
- Baja calidad inicial de los materiales de construcción.
- Baja calidad o falta de control en la mano de obra.

- Errores de estructuración y forma de la edificación.
- Mutilaciones o adiciones mal concebidas, para cambio de uso.
- Falta de mantenimiento.
- Incumplimiento de las mínimas normas de diseño y construcción sismo resistente establecidas en el código de construcción.

Edificaciones construidas entre 1985 y 1998

El segundo periodo se establece entre 1985 y 1998. A partir de 1984 con la expedición del CCCSR-84. Este parámetro recibe la calificación de 25 que corresponde a un grado de **vulnerabilidad Moderada**, debido a que:

- Las edificaciones construidas en este periodo, por lo general presentan todavía deficiencias estructurales y constructivas, incumpliendo en gran medida los requerimientos del CCCSR-84.
- A pesar de la existencia de este código de diseño y construcción sismo resistente, su aplicabilidad fue un proceso lento en los sectores populares, durante el periodo en mención, debido a la falta de medidas estrictas para el cumplimiento de las normas y de control por parte de las autoridades competentes (Licencias de Construcción).

La construcción progresiva de la vivienda popular es una constante generalizada de la mayoría de desarrollos urbanísticos en este periodo en Colombia, donde a pesar de la existencia de una normatividad constructiva, estos en su gran mayoría adolecen de los mínimos criterios técnicos, y si

existen, han sido mal concebidos.

Al respecto, en 1989 el presidente de la Sociedad Colombiana de Ingenieros ing. Luis Eduardo Laverde, que seis años después del terremoto de Popayán de 1983, todavía existían deficiencias en la aplicación del código de construcciones sismo resistentes, especialmente en las viviendas de uno y dos pisos. La falta de interventoría y el escaso control municipal habría distorsionado su uso. (Tomado del periódico El Tiempo abril, 1989. Por Martín Rosas Bernal *"Construcciones Antisísmicas: La Solución"*.)

Edificaciones construidas después de 1998

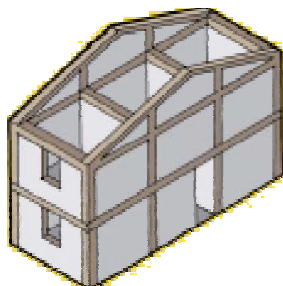
El tercer periodo se establece a partir de 1998, para el cual se considera que las edificaciones, cuentan con las mínimas normas de construcción sismo resistente estipuladas en el **Título E de la NSR-98**, a no ser que mediante la inspección visual se compruebe lo contrario. Este parámetro recibe la calificación de 5 que corresponde a un grado de **vulnerabilidad baja**, debido a que:

- La edificación fue diseñada y construida, como lo especifica la nueva Ley de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98, aplicando las mínimas normas estipuladas en el Título E de la misma.
- Se supone que las edificaciones cuentan con una licencia de construcción.

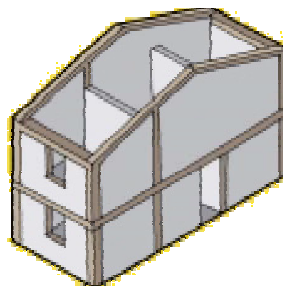
2. Sistema estructural (resistencia sísmica).

Mediante este indicador se determina el tipo de sistema resistente que compone la tipología estructural de la edificación, de muros portantes, que pueden estar confinados o reforzados. Para el caso específico de este estudio, las edificaciones se determinaron tres clasificaciones:

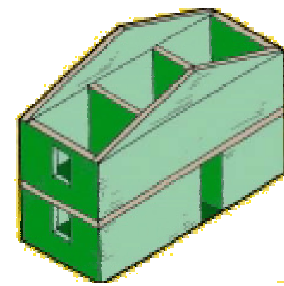
1. Edificaciones con tipología estructural de muros portantes de mampostería confinada (MC).
2. Edificaciones de mampostería parcialmente confinada (MPC).
3. Edificaciones de mampostería no confinada (MNC).



Edif. en mampostería confinada (MC)



Edif. en mampostería parcialmente confinada (MPC)



Edif. en mampostería no confinada (MNC)

AIS, 2001

Los parámetros utilizados para calificar este indicador, son:

Edificación en mampostería no confinada (MNC).

De acuerdo con la clasificación de las edificaciones existentes en la ciudad de Cali dada en *Campos* (1992), las edificaciones construidas antes de la vigencia del CCCSR-84, se componen de muros portantes de mampostería

no reforzada ni confinada. Por lo tanto, éstas edificaciones clasifican en el sistema estructural (MNC). En los casos en que no fue posible determinar y demostrar mediante una inspección visual la existencia de confinamiento en los muros, se asume que la edificación clasifica en (MNC). Este parámetro recibe la calificación de 50 que corresponde a un grado de **vulnerabilidad alta**.

Edificación en mampostería parcialmente confinada (MPC)

Se considera que la mampostería confinada se desarrolla a partir de 1985 con la expedición del CCCSR-84. Este parámetro recibe la calificación de 25 que corresponde a un grado de **vulnerabilidad moderada**, estableciéndose los siguientes criterios para su clasificación.

Las edificaciones construidas en el periodo comprendido entre 1985 y 1998, presentan todavía deficiencias constructivas, que no están acordes con lo estipulado en el CCCSR-84, como la utilización de acero liso como refuerzo principal, la parcialidad en la utilización del confinamiento en muros, falta de amarres, etc. Por lo tanto, esta edificación clasifica como sistema estructural de muros portantes (MPC). Donde no es posible determinar y demostrar mediante una inspección visual la parcialidad del confinamiento en los muros, se asume que la edificaciones califican como (MNC).

Edificación en mampostería confinada (MC).

Se considera que las edificaciones construidas después de 1998 cuentan con las mínimas normas de construcción sismo resistente. Por lo tanto las edificaciones clasifican como sistema estructural de muros portantes en (MC). Este parámetro recibe la calificación de 5, que corresponde a un grado de **vulnerabilidad baja**. Donde no es posible determinar y demostrar mediante una inspección visual la existencia de confinamiento en los muros, se asume que la edificación califica como (MNC).

3. Geometría (forma de la edificación).

Con base en los criterios establecidos en el marco teórico de este trabajo, éste indicador considera y califica el grado de vulnerabilidad sísmica de acuerdo con la configuración geométrica en planta y en altura de la edificación de la manera siguiente:

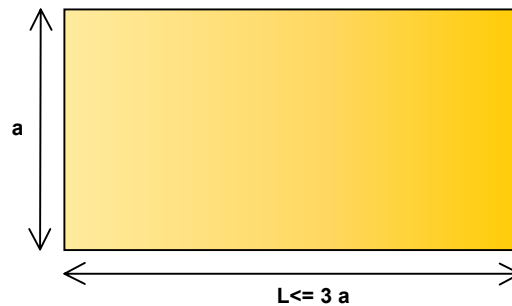
- **Configuración en planta.**

Los criterios establecidos para la calificación de este indicador de vulnerabilidad se realizan a partir de la determinación de la regularidad o irregularidad de la edificación en planta, mediante la medición de las área construidas (se considera la parte de la vivienda con cubierta) y área libre (que corresponde a las áreas de patios o corredores). Además de la determinación del ancho y largo de la edificación. Teniendo como base la cartografía disponible del sector en estudio o las cartas catastrales).

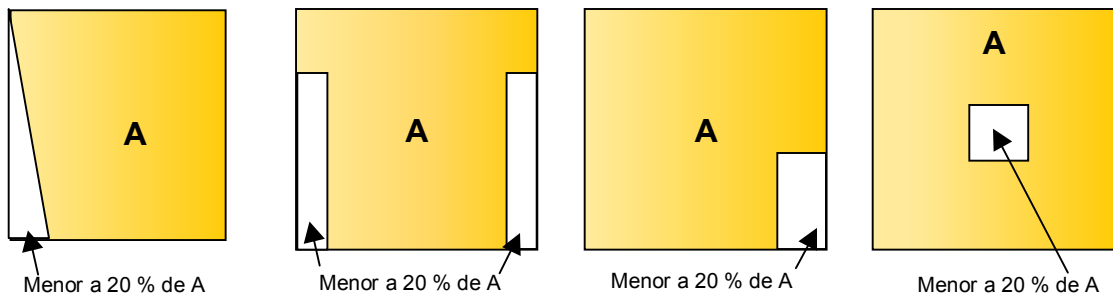
Regularidad en planta

Una edificación es regular en planta si:

- a. $L \leq 3a$ (Largo menor o igual tres veces su ancho).



- b. Su área en planta cumple alguna de las condiciones mostradas. Donde **A** es el área construida de la edificación.

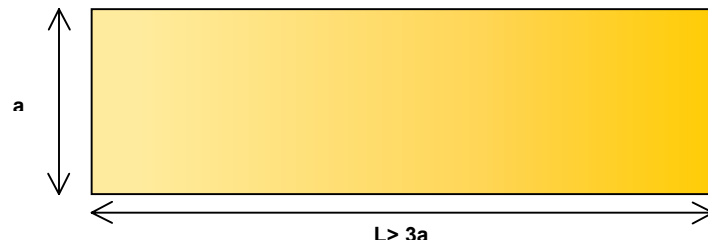


Su calificación será de 5, que corresponde a **vulnerabilidad baja**.

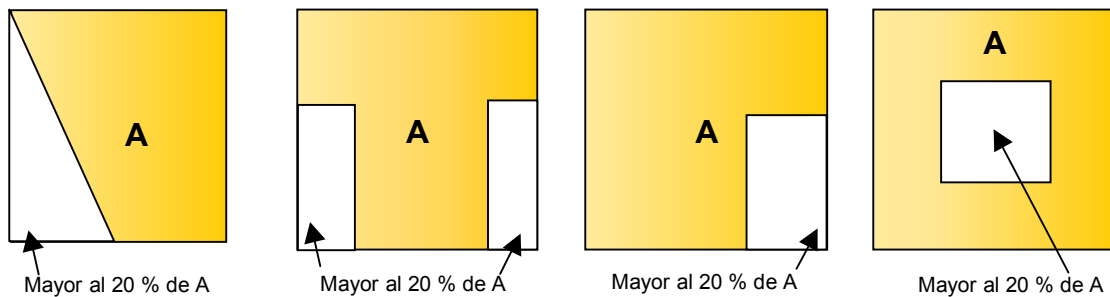
Irregularidad en planta

Una edificación presenta irregularidad en planta si:

- a. $L > 3a$ (Largo mayor a tres veces su ancho)



- b. Su área en planta cumple con las condiciones siguientes



Su calificación será de 50 que corresponde a **vulnerabilidad alta**.

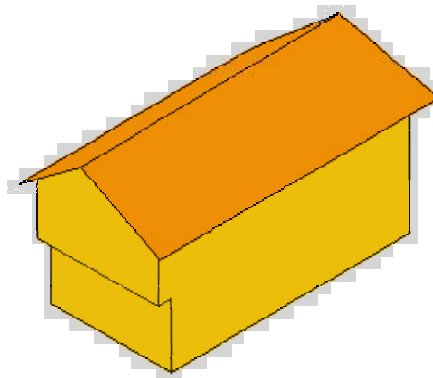
- **Configuración en Altura.**

Los criterios establecidos para la calificación de este parámetro se establecen a continuación:

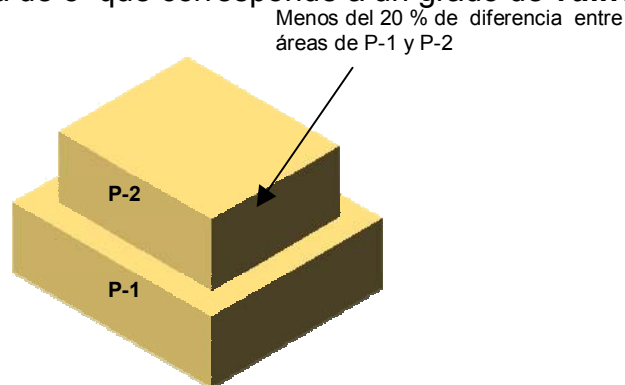
Regularidad en altura

La edificación es regular si:

- a. No presenta escalonamientos ni retrocesos o voladizos excesivos.

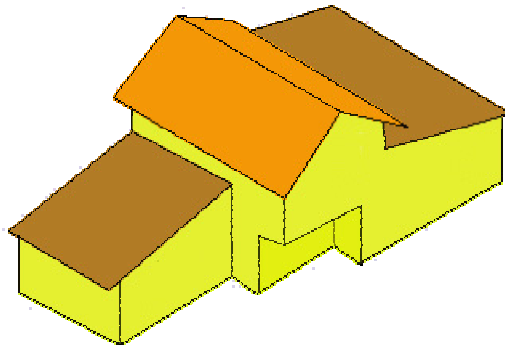


- b. la diferencia entre las áreas del piso inferior con respecto al superior no supera el 20 % y el piso superior está alineado con el piso inferior. Su calificación será de 5 que corresponde a un grado de **vulnerabilidad baja**.

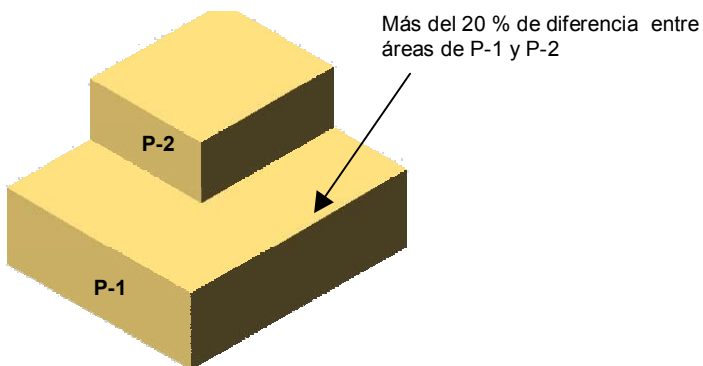


Irregularidad en altura

a. Presenta escalonamientos y retrocesos o voladizos excesivos



b. la diferencia entre las áreas del piso inferior con respecto al superior supera el 20 % y el piso superior de la edificación no está alineado con el piso inferior.



Este indicador recibe una calificación de 50 que corresponde a ***vulnerabilidad alta.***

4. Peso de la edificación.

De acuerdo con lo establecido en el marco teórico, el peso de una edificación influye de manera importante en el comportamiento sísmico del edificio. Entre más pesada sea una edificación las fuerzas actuantes sobre los componentes de la edificación serán mayores, lo que significa que si estas no están diseñadas para soportar este tipo de solicitaciones, podrán fallar ocasionando graves daños.

Se establecieron dos criterios que permiten de una manera cualitativa identificar los factores determinantes que inciden en el peso de una edificación, como el número de pisos y el peso de la cubierta, para los cuales se establecieron los siguientes criterios.

- **Número de pisos.**

Entre más pisos tenga una edificación su peso será mayor y por lo tanto las fuerzas inerciales se incrementarán.

Edificaciones de dos ó más pisos

Si la edificación tiene dos o más pisos, calificará con un valor de 50 que corresponde a ***vulnerabilidad alta***.

Edificaciones de un piso

Si la edificación es de un piso, calificará con un valor de 5 que corresponde a ***vulnerabilidad baja***.

- **Tipo de cubierta.**

Cuando una cubierta es muy pesada puede ocasionar un efecto de péndulo invertido causando grandes esfuerzos sobre los elementos de apoyo. Además, si no está debidamente amarrada o conectada con la estructura del edificio puede provocar la falla súbita de los muros de soporte, produciendo un efecto de volcamiento. Para calificar la incidencia del peso de la cubierta en el comportamiento sísmico de la edificación, se clasificaron según su peso.

Edificaciones con cubierta pesada

Pueden estar constituidas por teja de barro, por losas aligeradas ó macizas, y por la combinación de teja de barro más teja de asbesto cemento. La calificación asignada es 50 que corresponde a ***vulnerabilidad alta***.

Edificaciones con cubierta de peso moderado

Conformadas por teja de asbesto cemento. La calificación asignada es 25 que corresponde a ***vulnerabilidad moderada***.

Edificaciones con cubierta liviana

Conformadas por teja de zinc. La calificación asignada es de 5 que corresponde a ***vulnerabilidad baja***.

5. Rigidez de la edificación.

Esta propiedad constituye en factor importante dentro del comportamiento sísmico de una edificación, debido a que de ella dependen las deformaciones que pueda tener frente a las sollicitaciones sísmicas. De acuerdo con lo anterior una estructura muy flexible o poco sólida tiende a deformarse más y se pueden generar daños graves en paredes, elementos no arquitectónicos e instalaciones. Por lo tanto, debe existir una uniformidad en la distribución de la resistencia y ductilidad en cada uno de los componentes de la edificación. Para calificar la rigidez se determinaron los siguientes parámetros.

- **Cantidad de muros (resistencia sísmica de muros en las dos direcciones).**

Este indicador califica la vulnerabilidad sísmica en términos de la estimación de la mínima cantidad de muros que debe tener una edificación en cada una de sus dos direcciones, de acuerdo con su espesor y la zona sísmica en donde se encuentre. Para el cálculo de la longitud mínima de muros la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica establece la siguiente ecuación (A/S, 2001):

$$L_o = (M_o \times A_p)/t$$

Donde:

A_p = área en m² de la planta (Si la cubierta es liviana, lámina, asbesto cemento, A_p se puede multiplicar por 0.67).

t = espesor de muros en mm.

L_o = Longitud total de muros en una dirección.

Mo= coeficiente que se obtiene de la tabla siguiente.

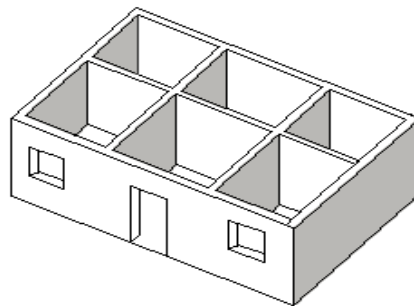
Tabla 18. Valor de (M_o) para distintas aceleraciones (A_a)

Zona sísmica	A_a	M_o
Alta	0.4	33
	0.35	30
	0.3	25
	0.25	21
Intermedia	0.2	17
	0.15	13
Baja	0.1	8
	0.05	4

Fuente: AIS, 2001

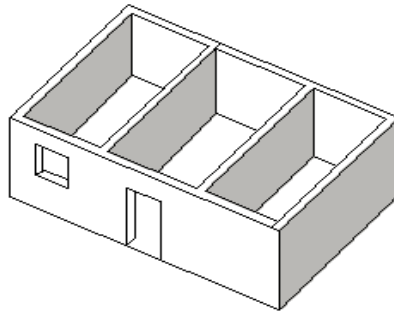
Cantidad óptima de muros

Sí existen muros estructurales en las dos direcciones principales de la edificación y estos están confinados o reforzados y hay una longitud total de muros en cada una de las dos direcciones principales al menos igual al valor dado por la ecuación arriba mostrada, la edificación calificará con un valor de 5 que corresponde a



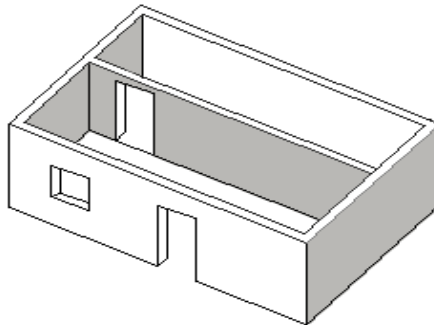
Cantidad aceptable de muros

Sí la mayoría de muros se concentran en una dirección, en un 60 %, ó los muros cumplen con la condición dada en la formula anterior, pero no están confinados ni reforzados, la edificación calificará con un valor de 25 que corresponde a ***vulnerabilidad moderada***.



Cantidad deficiente de muros

Más del 70 % de los muros están en una dirección ó la longitud total de muros estructurales en cualquier dirección es mucho menor que la calculada con la ecuación arriba expresada. La edificación calificara con un valor de 50 que corresponde a ***vulnerabilidad alta***.



- **Material de muros (calidad de la mampostería y morteros de pega).**

Califica la calidad de la mampostería utilizada en la construcción de las edificaciones del barrio San Antonio. La resistencia de la mampostería a la tracción y al corte depende principalmente del amarre o adherencia del contacto superficial entre la mampostería y el mortero.

El mortero usado para diferentes construcciones de muros varía en calidad así como en resistencia. Debido a que la resistencia a la tracción y al corte es importante en la resistencia sísmica en los muros de mampostería, el uso de barro o mortero pobre es perjudicial para su adecuado comportamiento sísmico. (*CISMID*, 1980). Cuanto más rico sea el mortero en contenido de cemento o cal, mas alto es el porcentaje de la resistencia a la tracción a al corte.

Cabe señalar que muchas de las fallas observado en terremotos anteriores en las construcciones de adobe se deben a la baja calidad de los adobes y los morteros de pega y a la poca resistencia inherente de este material a grandes esfuerzos y deformaciones (ausencia de ductilidad).

También es necesario considerar que edificaciones construidas en unidades de ladrillo cocido y pegados con morteros compuestos de cal y arena no ofrecen un adecuado comportamiento sísmico como el caso de muchas edificaciones afectadas por el terremoto de Cúcuta de 1981 (*Sarria*, 1985).

Se puede decir que las edificaciones construidas en unidades de mampostería de ladrillo pegados con morteros compuestos por cemento y arena, son más resistentes a fallar, a diferencia de los dos tipos de mampostería ya mencionado.

De acuerdo con lo anterior para el barrio San Antonio se establecieron los siguientes criterios que califican la vulnerabilidad, teniendo en cuenta el tipo de mampostería y mortero de pega utilizados.

Material de muros de comportamiento deficiente

Las edificaciones cuyos muros están conformados por unidades de mampostería de adobe y mortero de barro reciben una calificación de 50 que corresponde a ***vulnerabilidad alta***.

Material de muros de comportamiento aceptable

Las edificaciones cuyos muros están conformados por unidades de mampostería de ladrillo de arcilla cocida y mortero compuesto por cal y arena popularmente llamado “calicanto” ó “argamasa” reciben una calificación de 25, que corresponde a una ***vulnerabilidad moderada***.

Material de muros de comportamiento óptimo

Las edificaciones cuyos muros están conformados por unidades de mampostería de ladrillo de arcilla cocida y mortero compuesto por cemento y arena reciben una calificación de 5, que corresponde a una ***vulnerabilidad baja***.

- **Espesor de Muros.**

De acuerdo con la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS, 2001), los muros portantes o estructurales de una de una edificación deben tener espesores mayores o iguales a los mínimos de acuerdo a la zona de amenaza sísmica de una región determinada. Entre mayor sea el espesor de los muros de una edificación, mayor será la resistencia a los esfuerzos generados por la carga sísmica, proporcionándole una mejor estabilidad así como una mejor transmisión de las cargas, tanto estáticas como dinámicas, y una mayor rigidez.

Tabla 19. Espesor mínimo de muros en centímetros

Amenaza sísmica	Número de niveles de construcción		
	Un piso	Dos pisos	
		1 piso	2 piso
Alta	11	11	10
Intermedia	10	11	9.5
Baja	9.5	11	9.5

Fuente (AIS, 2001)

Vale la pena señalar que los espesores de los muros para el barrio San Antonio se determinaron de acuerdo con las observaciones realizadas, el espesor promedio de muros de las edificaciones modernas es de 15 cm, para edificaciones republicanas y de tradición colonial es mayor a 40 cm y para edificaciones eclécticas es en promedio de 20 cm.

De acuerdo con la tabla anterior, se puede decir que las edificaciones del barrio San Antonio en un 100 % cumplen con las especificaciones mínimas de espesores de muros que establece la AIS. Para propósito de este estudio se plantean los siguiente criterios para la calificación de este indicador, teniendo como fundamento teórico que entre mayor sea el espesor de un muro mayor será su resistencia y estabilidad frente a las solicitaciones estáticas y dinámicas.

Espesor de muros ≤ 15 cm

Si el espesor de los muros es menor o igual a 15 cm, recibe una calificación de 50 que corresponde a ***vulnerabilidad alta***.

Espesor de muros > 15 cm < 40 cm

Si el espesor de los muros es mayor a 15 cm y menor a 40, recibe una calificación de 25, que corresponde a ***vulnerabilidad moderada***.

Espesor de muros ≥ 40 cm

Si el espesor de los muros es mayor a 40 cm, recibe una calificación de 5, que corresponde a ***vulnerabilidad baja***.

- **Altura de muros.**

De acuerdo con AIS (2001), los muros portantes o estructurales de edificaciones de 1 y 2 pisos no deben ser muy esbeltos. Entre mayor altura tenga un muro, dependiendo de las cargas a que sea sometido, tenderá a pandearse o a flexionarse, siendo expuesto a mayores deformaciones, afectando la rigidez global de la edificación. De esta forma, se sabe que la

altura de un muro no debe ser mayor a 20 veces su espesor (*CISMID*, 1980). En este orden de ideas, se establecieron los siguientes criterios para la calificación de la vulnerabilidad por altura de muros:

Altura óptima de muros

Si la altura de los muros es menor o igual a 20 veces su espesor recibirá una calificación de 5, lo cual corresponde a ***vulnerabilidad baja***.

Altura de muros deficiente

Si la altura de los muros es mayor a 20 veces su espesor, recibirá una calificación de 50, que corresponde a una ***vulnerabilidad alta***.

6. Elementos no estructurales.

En este indicador se tiene en cuenta la presencia de áticos o parapetos, cornisas, aleros, voladizos, adornos, antepechos o cualquier otro elemento no estructural, que pueda fallar o causar daño a las personas. De acuerdo con la anterior se establecieron los siguientes criterios de calificación:

Elementos no estructurales susceptibles a caerse

Si el edificio presenta elementos no estructurales susceptibles a caerse como los mencionados anteriormente, calificará con 50, lo cual significa ***vulnerabilidad alta***.

Elemento no estructurales bien amarrados

Si no presenta elementos no estructurales susceptibles a caerse como los mencionados anteriormente, la edificación calificará con 5, lo cual significa ***vulnerabilidad baja***.

7. Suelo y cimentación.

Las características geotécnicas de los depósitos sobre el cual se asienta una edificación influyen en la respuesta sísmica de la misma. Las cimentaciones o el sistema de apoyo sobre el cual la edificación transmite sus cargas puede ser afectada por hundimientos, deslizamientos o pérdidas de la capacidad portante del suelo, lo cual puede hacer altamente vulnerable una edificación. Se definieron 3 parámetros o indicadores que pueden caracterizar la vulnerabilidad de una edificación sobre un tipo de suelo determinado estos son:

- **Coeficiente de sitio.**

Con base en la zonificación preliminar de coeficientes de sitio realizadas por el Observatorio Sismológico del SurOccidente OSSO, se definen los siguientes criterios para la calificación de la vulnerabilidad. Estos son:

Perfil de Suelo S-1

Si la edificación se asienta sobre un tipo de perfil de suelo S1, se califica con 5, que corresponde a ***vulnerabilidad baja***.

Perfil de suelo S-2 ó S-3

Si la edificación se asienta sobre un tipo de perfil de suelo S2 o S3, se califica con 25, que corresponde a vulnerabilidad moderada.

Perfil de suelo S-4

Si la edificación se asienta sobre un tipo de perfil de suelo S4, se califica con 50, que corresponde a ***vulnerabilidad alta***.

- **Terreno de fundación.**

Este parámetro califica el grado de consistencia del suelo y la estabilidad de los depósitos de suelo sobre los cuales se asientan las edificaciones, a partir de los siguientes criterios:

Suelo de consistencia firme

Si la edificación se asienta sobre un suelo de consistencia firme, calificará con 5, que corresponde a ***vulnerabilidad baja***.

Suelo de consistencia intermedia

Si la edificación se asienta sobre un suelo de consistencia mediana, calificará con 25, que corresponde a ***vulnerabilidad moderada***.

Suelo de consistencia blanda

Si la edificación se asienta sobre un suelo de consistencia blanda, calificará con 50, que corresponde a ***vulnerabilidad alta***.

- **Posición del edificio y la cimentación.**

Con este parámetro se evalúa, hasta donde sea posible, por medio de una inspección visual la influencia del terreno y la cimentación en el comportamiento sísmico del edificio, para ello, se tienen en cuenta la pendiente del terreno y el tipo de cimentación de la edificación. Los criterios para la calificación de la vulnerabilidad son:

Pendiente del terreno $\leq 30\%$

Si la edificación está asentada sobre una pendiente inferior o igual al 30% y su cimentación tiene presencia de vigas de amarre, recibe una calificación de 5, que corresponde a ***vulnerabilidad baja***.

Pendiente del terreno $> 30\%$ y $< 50\%$

Si la edificación está asentada sobre una pendiente entre el 30% y el 50%, recibe una calificación de 25, que corresponde a ***vulnerabilidad moderada***.

Pendiente del terreno $> 50\%$

Si la edificación está asentada sobre una pendiente mayor al 50%, recibe una calificación de 50, que corresponde a ***vulnerabilidad alta***.

8. Estado de conservación.

Este parámetro tiene en cuenta el estado de conservación en que se encuentre la edificación y califica su vulnerabilidad de acuerdo con los siguientes criterios:

Edificación en buen estado

Si la edificación está en buen estado, es decir, la estructura, la unidad de construcción y el aspecto físico demuestran calidad, resistencia y conservación, recibe una calificación de 5 que corresponde a vulnerabilidad, que corresponde a una ***vulnerabilidad baja***.

Edificación en regular estado

Si la edificación está en regular estado, es decir, la estructura, la unidad de construcción y el aspecto físico demuestran que ha sufrido deterioro en cuanto a calidad, resistencia y conservación, recibe una calificación de 25 que corresponde a una ***vulnerabilidad moderada***.

Edificación en mal estado

Si la edificación está en mal estado, es decir, cuando la construcción ha entrado en un franco deterioro de la estructura, unidad arquitectónica y estado ruinoso de los materiales con que fue construida, recibe una calificación de 50 que corresponde a una ***vulnerabilidad alta***

6.3.3 Ventajas de la metodología.

- **Diagnóstico inicial.**

La metodología permite obtener como resultado un estudio preliminar que se constituye en una base para el posterior desarrollo de diagnósticos de mayor grado de precisión, cuyo fin es identificar las edificaciones y las posibles causas de daño sísmico de mayor prioridad para la intervención de la vulnerabilidad.

- **Flexibilidad - grado de detalle.**

Este método permite fácilmente la consideración de un menor o mayor número de indicadores de vulnerabilidad, dependiendo del grado de detalle que se requiera y de los resultados esperados.

- **Análisis global y análisis particular.**

También es posible analizar de manera particular la influencia de cada indicador en la vulnerabilidad física-global de la edificación, lo que significa que es posible a partir de la identificación de los elementos susceptibles de sufrir o generar daño sísmico, establecer acciones más directas conducentes a la intervención de la vulnerabilidad, es decir, mitigar el riesgo.

- **Conocimiento integral de la zona de estudio.**

Otra ventaja del método, es que permite un conocimiento más profundo de la realidad de la vulnerabilidad y del riesgo de una localidad o un sector de la ciudad, debido a que se deben tener en cuenta las características constructivas, arquitectónicas, estructurales y de conservación.

- **Integración con SIG - Sistema de Información Geográfica .**

Se puede integrar con un sistema de información geográfico, el cual muestra la distribución espacial de los escenarios en la zona de estudio, con mayor susceptibilidad al daño sísmico, además, de las zonas más vulnerables de acuerdo con los criterios establecidos. La herramienta del SIG, facilita el análisis y la representación de los resultados gráficamente en mapas.

7. INVENTARIO DE LAS EDIFICACIONES

7.1 GENERALIDADES

Debido a la imposibilidad de abarcar todos los elementos materiales expuestos a la amenaza sísmica en el barrio San Antonio, como líneas vitales, edificaciones esenciales, etc., se determinó para propósitos del presente trabajo, que los elementos con mayor representatividad al interior del barrio están conformados por edificaciones de uno y dos pisos como se muestra en la figura.

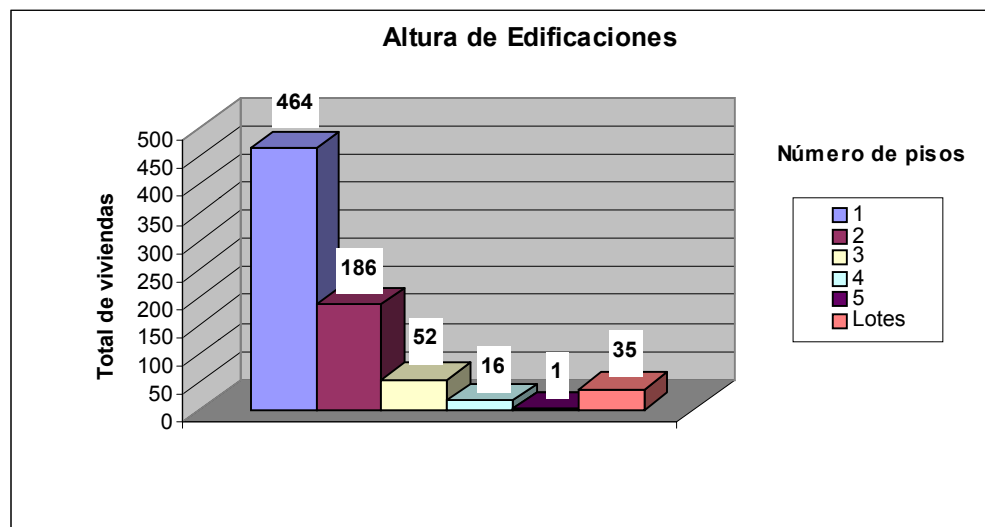


Figura 113. Distribución de alturas de edificaciones barrio San Antonio

La selección de la muestra de edificaciones a estudiar “*población objetivo*”, correspondió al total de las unidades o elementos definidos como prioritarios para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, es decir, todas las edificaciones de 1 y 2 pisos del barrio, alrededor de 650, estimadas a partir de la información contenida en el “Plan de Recuperación Urbanística y Arquitectónica del Barrio San Antonio 1998-2000” (SMP, 1998).

De las 650 edificaciones que corresponde al 100 % de la población muestreada en las 27 manzanas, se consideró para su estudio el 87 % es decir 570, debido a que el 13 % restante equivalente a 80 edificaciones no se consideraron por carecer de datos confiables.

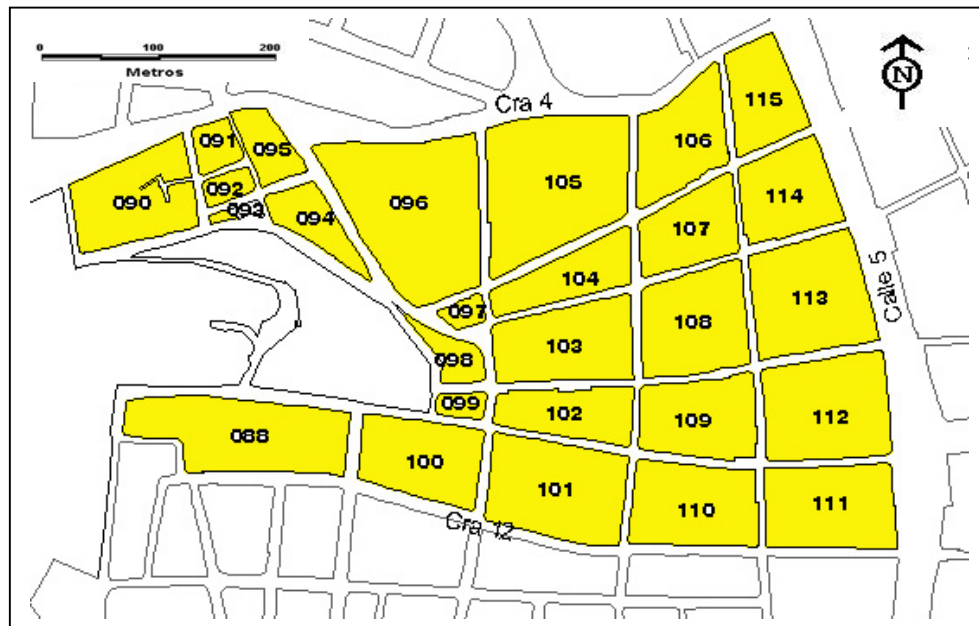


Figura 114. Distribución espacial de manzanas estudiadas.

Tabla 20. Edificaciones estudiadas por manzanas

Manzana	ESTILO ARQUITECTÓNICO				
	Colonial	Republicano	Ecléctico	Moderno	Total
88	0	9	2	15	26
90	0	3	1	12	16
91	0	0	3	7	10
92	1	2	1	4	8
93	0	0	1	1	2
94	0	1	3	2	6
95	1	3	2	11	17
96	5	19	10	14	48
97	1	3	1	1	6
98	0	1	3	0	4
99	0	2	1	0	3
100	1	12	7	7	27
101	3	5	18	7	33
102	6	5	4	15	30
103	6	10	12	3	31
104	1	11	13	2	27
105	2	14	15	6	37
106	1	12	4	1	18
107	2	12	8	0	22
108	10	9	2	8	29
109	9	7	10	0	26
110	2	10	11	7	30
111	5	2	8	14	29
112	2	12	10	8	32
113	4	16	6	3	29
114	4	5	3	3	15
115	2	1	5	1	9
Total de edificaciones estudiadas					570

Es necesario aclarar que el inventario de los elementos expuestos se realizó, considerando el espacio construido en cada predio como una edificación y no como unidad de vivienda, debido a que en un predio puede existir una o varias unidades de vivienda (unifamiliar, bifamiliar, trifamiliar y multifamiliar)

que se caracterizan de acuerdo con *SMP* (1998), por tener un acceso directo de la vía pública y sus servicios e instalaciones propias. La distribución espacial de las edificaciones estudiadas se muestra en el grafico siguiente.

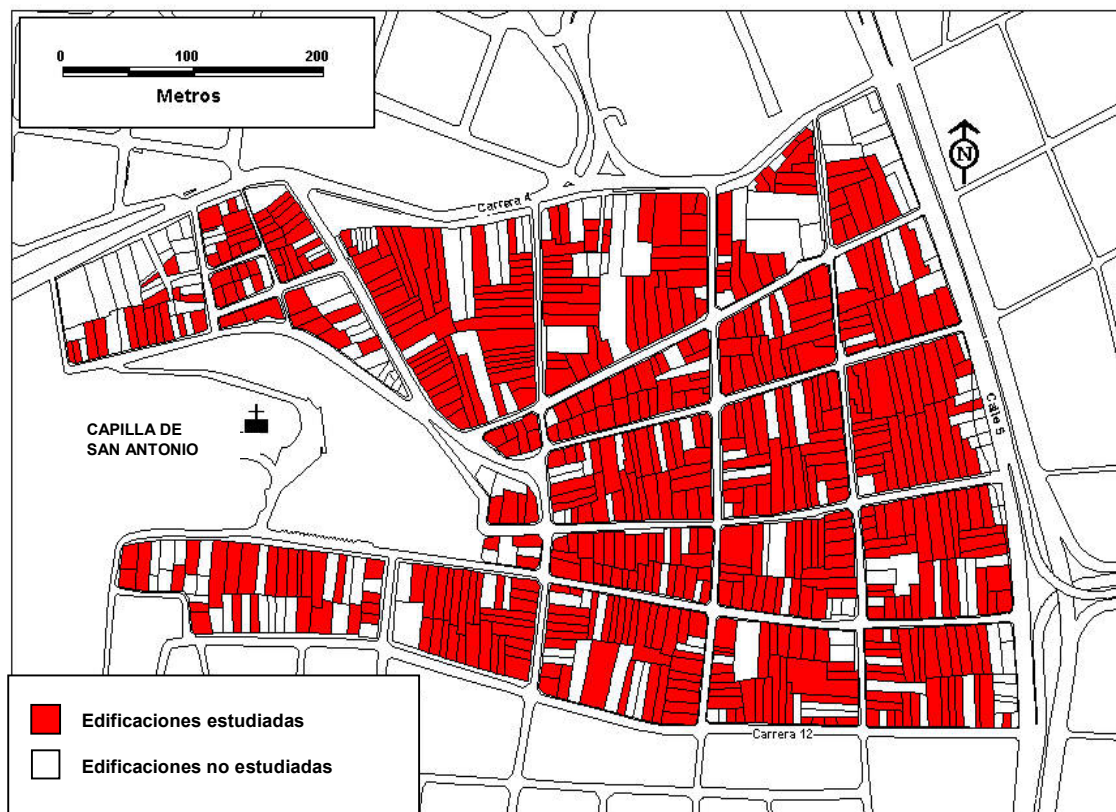


Figura 115. Población de edificaciones estudiadas.

7.2 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para la recolección de información se procedió a realizar una revisión específica de los datos existentes, tanto de fuentes primarias como secundarias obtenidas de documentación histórica, fotográfica y cartográfica, tanto en lo planimétrico a escala urbana como de levantamientos arquitectónicos. Esto se complementó con un trabajo de campo desarrollado a partir de las inspecciones visuales realizadas a las edificaciones localizadas en el área de estudio, con el fin de definir al interior del barrio las características tipológicas de las construcciones, teniendo en cuenta el estilo arquitectónico como elemento fundamental para caracterizarlas.

Del estudio “*Plan de Recuperación Urbanístico y Arquitectónico 1998-2000*, del barrio San Antonio” (SMP, 1998), se obtuvo información básica sobre cada predio, como el número catastral, nomenclatura, estilo arquitectónico, uso y número de pisos como se muestra en el **anexo A.1**, un inventario fotográfico, en el cual se registra cada una de las edificaciones y también la planimetría básica del barrio actualizada y amarrada al plano digital de la ciudad.

Con base en la información recolectada en primera instancia se realizó el reconocimiento del barrio, mediante una inspección visual y cualitativa para determinar los diferentes tipos de edificaciones y los sectores existentes, corroborando la concordancia de la información planimétrica disponible con la realidad del entorno construido.

Con el fin de poder establecer posibles escenarios de vulnerabilidad y de daño sísmico para las edificaciones de mampostería de uno y dos del barrio, de manera preliminar, abarcando un total de 570 (87 %), se procedió a realizar las inspecciones de campo teniendo como base el inventario arquitectónico y urbanístico del barrio realizado por la sociedad de Mejoras Públicas de Cali (SMP, 1998), además de otros estudios adelantados por la Cámara de Comercio de Cali y la Escuela de Arquitectura de la Universidad del Valle, de los cuales se obtuvieron las características arquitectónicas, la planimetría predial y algunos levantamientos arquitectónicos. La información fue analizada, filtrada y procesada; con base en esto se determinaron las áreas construidas a partir de la medición de las áreas sobre el plano, teniendo en cuenta las áreas libres como solares y patios.

La información anterior se cruzó con la información recolectada en campo, mediante dos tipos de inspecciones: una visual exterior en la mayoría de viviendas (60 %) aprovechando el perfil urbano que conforman debido a la topografía, identificando fachadas, muros exteriores, cubiertas, además de observaciones de espacios interiores a través de puertas y ventanas, complementada con información oral de los residentes. La otra, una inspección de tipo visual interior se realizó en algunas viviendas del sector a las cuales se tuvo acceso parcial (25 %) (Patios, solares ó corredores) y total (15 %). Al igual que la inspección exterior esta se apoyó con información oral de los habitantes.

Formulario para la recolección de datos en campo

Para la recolección de la información se diseñó un formulario del **anexo A.2**, que tiene en cuenta los aspectos generales, constructivos, estructurales y no estructurales, geométricos, del entorno y estado de conservación de la edificación analizada.

Descripción del formulario

- **Aspectos generales**

Este ítem recoge información referente a la localización de la edificación dentro del barrio y tiene en cuenta la dirección, el número del predio, el número de la manzana, el nombre del propietario, el número de pisos, la época de construcción, estilo arquitectónico y el uso.

- **Aspectos constructivos.**

En este ítem se recoge información referente, al tipo de material en que fue construida la edificación y que constituyen los muros, entrepisos y la cubierta.

- **Aspectos estructurales y no estructurales.**

Aquí se recoge información sobre el sistema estructural del edificio, se determina si es de MC, MPC ó MNC. Se identifica los elementos no estructurales vulnerables como áticos, cornizas, antepechos, adornos, entre

otros.

- **Aspectos geométricos**

Este aspecto recoge información referente a la geometría de la edificación, tanto en planta como en altura.

- **Aspectos del entorno**

Aquí se recoge información referente al tipo de suelo y la topografía sobre el que se asienta la edificación.

- **Aspectos de mantenimiento**

Aquí se recoge información sobre el estado de conservación de la edificación.

- **Información gráfica**

En este ítem esta compuesto por la localización espacial de la manzana y el predio en estudio, la respectiva foto de la edificación además de un espacio para esquemas.

- **Observaciones**

En este ítem se anotan las observaciones que se consideren importantes resultado de la inspección visual de las edificaciones.

Las partes que constituyen el formulario se muestran en la siguiente figura:

FORMULARIO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO

Cod. ficha:

Fecha: Evaluador: _____ Propietario: _____
Día Mes Año

Comuna: Barrio: _____ Dirección: _____ Cod. Predio: Año cons:

Est. Arg. ☐ T. C. ☐ Rep. ☐ Ex. ☐ Mod. ☐ Uso: Ed. ☐ Col. ☐ M. ☐ O. ☐ Cud? ☐ N° de pisos: ☐ 1o. ☐ 2o.

Localización Manzana



Localización predio



Esquemas:

Foto



ASPECTOS CONSTRUCTIVOS		ASPECTOS GEOMÉTRICOS		
MATERIAL DE MUROS		CONF. EN ALTURA		
Adobe ☐	Ladrillo cocido ☐	Regular ☐	Irregular ☐	
Buhareque ☐	Otro ☐	CONF. EN PLANTA		
TIPO DE CUBIERTA		Regular ☐	Irregular ☐	
Teja de barro ☐	Asbesto cemento ☐	ASPECTOS DEL ENTORNO		
Zinc ☐	Losa ☐	TIPO DE SUELO		
TIPO DE ENTREPISO		Firme ☐	Intermedio ☐	
Losa aligerada ☐	Madera ☐	Blando ☐	TOPOGRAFÍA	
No posee ☐	Plana ☐		Intermedia ☐	
ASPECTOS ESTRUCTURALES		ASPECTOS NO ESTRUCTURALES		
SIST. ESTRUCTURAL		ELEM. VULNERABLES		
MNC ☐	MPC ☐	Ático ☐	Comisas ☐	
MC ☐	Adornos ☐		Ninguno ☐	
ASPECTO DE MANTENIMIENTO				
ESTADO DE CONSER.				
Bueno ☐	Regular ☐	Malo ☐		

Observaciones:

Figura 116. Partes del formulario de recolección de datos en campo.

Equipo requerido.

El equipo requerido para el trabajo de campo se conformó por una cámara fotográfica, los formularios para el levantamiento de la información, la cartografía de la zona de estudio, una tabla de apoyo, portaminas.

7.3 ANALISIS DEL INVENTARIO

A partir de los resultado del inventario que se muestra en el **anexo A.3**, se definen de manera general las características arquitectónicas, constructivas y estructurales de las edificaciones del barrio, teniendo en cuenta la información recolectada de fuentes documentales, inspecciones visuales, información oral, etc., los cuales permiten identificar parametros físicos e indicadores de vulnerabilidad y que sirven como insumo para el desarrollo de los objetivos de este trabajo.

1. Características arquitectónicas.

De acuerdo con *SMP* (1998), las edificaciones se pueden clasificar según sus estilos arquitectónicos. En ese orden de ideas, se determinaron unas características tipológicas de las construcciones que componen el barrio, de acuerdo con la clasificación estilística que los diferencian entre sí, como la distribución arquitectónica, el numero de vanos de puertas y ventanas, el tipo de fachada, tipo adornos, etc. las cuales se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 21. Características arquitectónicas de las edificaciones por estilos

Tradición Colonial	Republicano	Ecléctico	Moderno popular
1. Un piso. 2. Patio solar posterior. 3. Uno a dos vanos en fachada. 4. Colores primarios en puertas y ventanas. 5. Muros pintados con cal. 6. Planta rectangular. 7. Cuartos alrededor de un recinto central (sala o estar). 8. Alero.	1. Generalmente de un piso de 4m a 6m. 2. Ritmos de ventanas y puertas en fachada. 3. Dimensiones puertas y ventanas hasta los 3 m. 4. Rejas y elementos decorativos en vanos. 5. Patio central y patio de servicios o solar 6. Planta rectangular. 7. Presencia de zaguán o corredor 8. Cuartos alrededor del patio central 9. Alero.	1. Generalmente de dos pisos. 2. Presentan ático 3. Elementos decorativos como cornisas, marquesinas y adornos. 4. Se elimina patios estilo republicano corredores y pilares. 5. Enchapes, texturas. 6. Uso de colores fuertes. 7. Planta rectangular. 8. Zócalos con texturas.	1. Uno y más pisos 2. Terrazas. 3. Supresión de aleros. 4. Garajes 5. Texturas en fachadas, enchapes. 6. Retrocesos. 7. Voladizos. 8. Plantas rectangulares 9. Mayor porcentaje de vanos en fachada. 10. Altura de pisos comparativamente menor a la arquitectura republicana y ecléctica.

Fuente: Elaborada, a partir de SMP (1998)

El estilo arquitectónico con mayor presencia en el barrio como se muestra en la figura 117, esta representado por el republicano en un 33 %, seguido por el ecléctico al rededor de un 28 %, el moderno por el 26 % y por último el colonial en un 13 %.

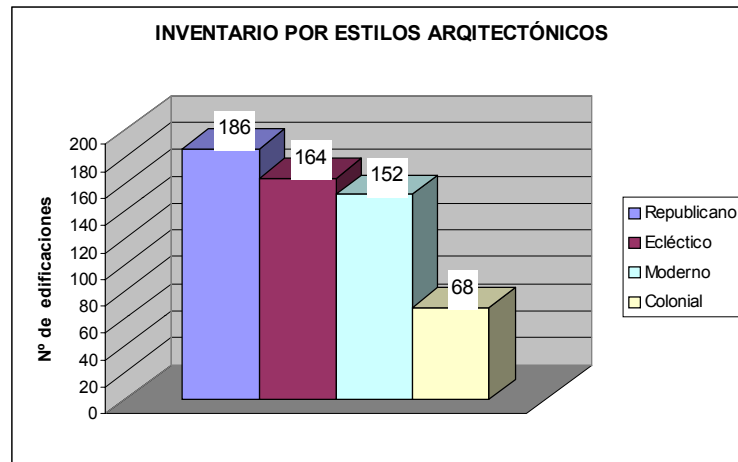


Figura 117. Distribución del inventario por estilos arquitectónicos.

Ante la carencia de información sobre fechas exactas de construcción por tratarse de un barrio antiguo, el estilo arquitectónico se constituyó en el indicador o marco de referencia al cual se le asocio un periodo de construcción, con base en las investigaciones realizadas mostradas en el Capítulo 3 sobre el desarrollo urbanístico de Cali y sus implicaciones en la vulnerabilidad sísmica, y el Capítulo 4 sobre el contexto del barrio San Antonio, en el numeral de evolución de las construcciones.

Teniendo en cuenta lo anterior se definieron dos periodos de construcción. El primero comprende las edificaciones construidas antes de 1950, que corresponden a los estilos arquitectónicos de tradición colonial, republicana y ecléctica; el segundo corresponde a las edificaciones construidas después de 1950 y que corresponden en su mayoría a edificaciones de estilo moderno popular.

Sin embargo, esta consideración es pertinente hacerla con la debida reserva debido al grado de intervención que pueden haber sufrido las edificaciones en los últimos años, lo cual ameritaría un conocimiento específico y una investigación mas profunda y particular para cada edificación.

Se estimó que alrededor del 73 % de las edificaciones se construyeron antes de 1950 y el 27 % restante después de 1950 como se observa e la figura 118).

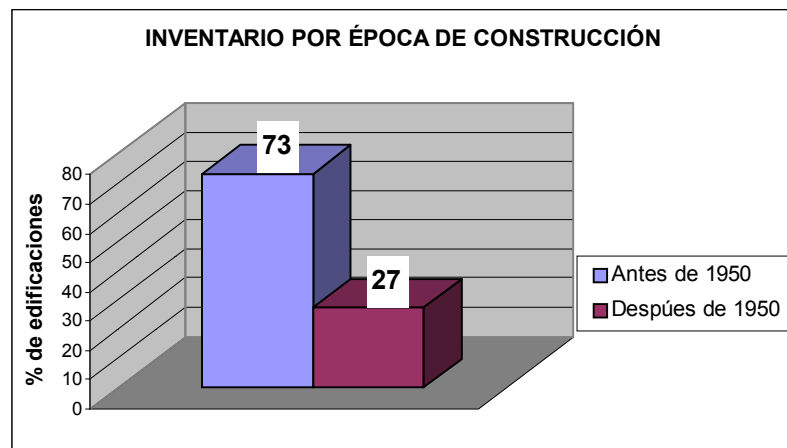


Figura 118. Distribución del inventario por periodos de construcción

Se pudo establecer que el 72 % de las edificaciones objeto de estudio corresponden a un piso, el 28 % restante corresponde a dos pisos (figura 119). Este hecho puede explicarse debido a que por la topografía y las normas urbanísticas existentes en el barrio San Antonio, la mayoría de sus edificaciones se adaptan a la forma del terreno, produciendo un perfil urbano escalonado en el sentido de las vías, lo que ha generado, con algunas

excepciones, que la altura de gran cantidad de las edificaciones varíe de uno a dos pisos.

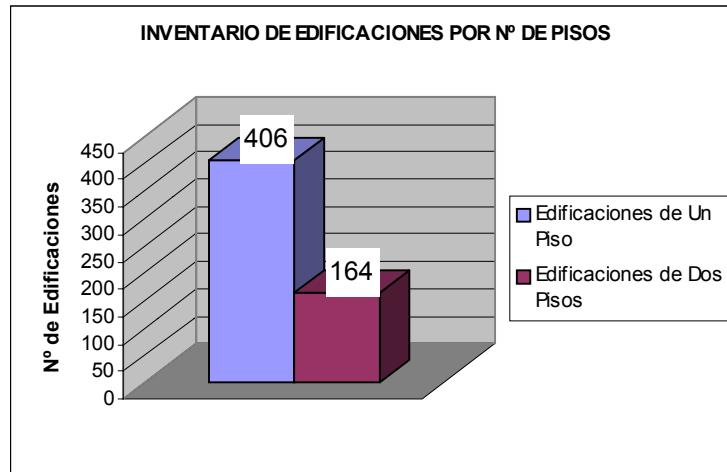


Figura 119. Distribución del inventario por número de pisos

El uso principal de las edificaciones es de carácter residencial en un 83 %; El 5 % corresponde a uso mixto como el residencial-comercial; un 5 % corresponde a uso comercial; y finalmente el 7 % esta destinado a otros usos como institucional, oficinas etc., (figura 120).

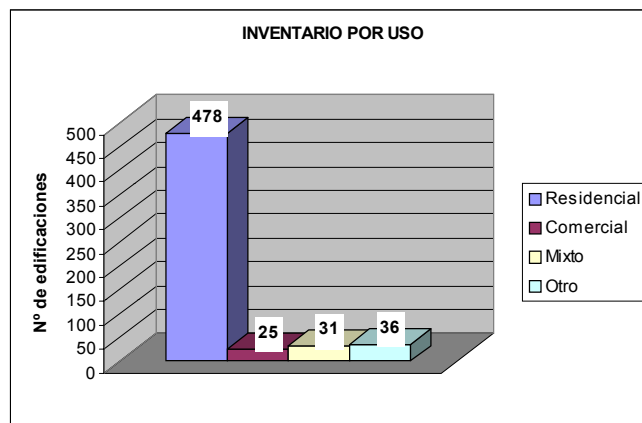


Figura 120. Distribución del inventario por uso

2. Características estructurales.

Se identificó que la tipología estructural predominante en el barrio, está compuesta por muros portantes que pueden ser de MC, MPC ó MNC, en materiales como el adobe o el ladrillo cocido.

En gran número de casos las tipologías estructurales, presentan adiciones, modificaciones o reformas que afectan el adecuado comportamiento estructural del edificio. Por ejemplo: fachadas en otro material que no se amarran efectivamente al resto de los muros del edificio, adiciones interiores en muros de ladrillo, eliminación de muros para ampliación de espacios o creación de vanos.

Tabla 22. Características estructurales de las edificaciones por estilo.

Tradición Colonial	Republicano	Ecléctico	Moderno popular
1. Cimentación Ciclópea. 2. Muros portantes. 3. Mampostería no confinada ni reforzada.	1. Cimentación Ciclópea. 2. Muros portantes. 3. Mampostería no confinada ni reforzada.	1. Cimentación Ciclópea y en ladrillo. 2. Muros portantes. 3. Mampostería no confinada ni reforzada.	1. Cimentación Ciclópea. 2. Vigas de cimentación 3. Muros portantes. 4. Mampostería no confinada, parcialmente confinada, y confinada.

Se estimó que el sistema estructural predominante en el barrio es el de mampostería no confinada (MNC) al rededor de un 75 % y el 25 % restante corresponde a edificaciones de mampostería parcialmente confinada (MPC)

(figura 121).

De acuerdo con las inspecciones realizadas y desde el punto de vista estricto de la Norma sísmo resistente colombiana NSR-98 en su Título E, que trata sobre construcción de edificaciones de uno y dos pisos, se puede afirmar que no existen edificaciones que cumplan en su totalidad las especificaciones estipuladas en el reglamento en mención, lo que si es claro muchas de las edificaciones estudiadas presentan un sistema estructural parcialmente confinado, producto de la construcción progresiva.

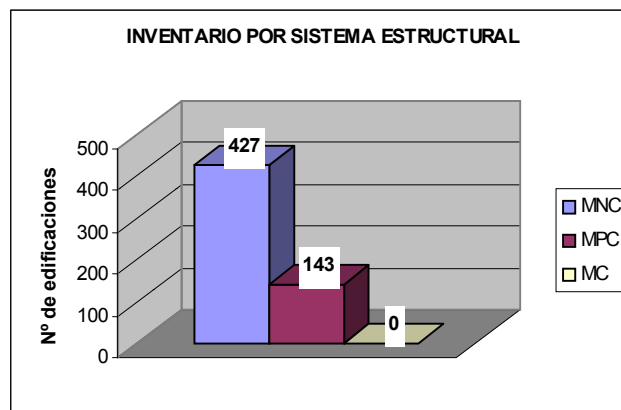


Figura 121. Distribución del inventario por sistema estructural.

Características constructivas.

Las características constructivas varían según el estilo, así mismo son expresión de las técnicas empleadas en una determinada época. Cada tipo de material tiene un comportamiento típico frente a los sismos, lo cual sirve de indicador para calcular la vulnerabilidad sísmica de los edificios.

Las edificaciones de tradición tradicional y republicana, en su gran mayoría, de un piso, se caracterizan por estar edificadas sobre cimientos elaborados con piedra y barro, sobre los cuales se levantan muros de mampostería no reforzada o confinada en adobe, cuyas unidades de mampostería son pegadas con morteros de barro. Las de tradición colonial presentan en sus muros pocas aberturas, las cuales son de pequeñas dimensiones, propias de esta arquitectura, además los dinteles sobre puertas y las ventanas son de madera.

Las edificaciones de estilo republicano a diferencia de las de tradición colonial, presentan mayor cantidad de vanos en sus muros, con dinteles de madera sobre puertas y ventanas.

En el barrio se distinguen dos tipos de unidades de mampostería, los contruidos con adobe y ladrillo de arcilla cocido, pegados con morteros compuestos por cemento/arena, arena/cal ó morteros pobres y barro.

Se puede decir que las edificaciones de estilo de tradición colonial y republicanas en su gran mayoría, están contruidas con unidades de mampostería de adobe (mezcla de barro+agua+paja) que utilizan como mortero el mismo material de los adobes.

Los muros pueden tener espesores que varían de 40 cm hasta 80 cm ó 100 cm, de acuerdo con la disposición de los elementos mampuestos en soga y tizón, algunos conforman machones de adobe.



Figura 122. Detalle de un muro de adobe.

Las edificaciones de estilo ecléctico en su gran mayoría están construidas con unidades de mampostería de ladrillo cocido, pegados con morteros compuestos de cal y arena (morteros pobres) popularmente llamado argamasa ó calicanto, estos muros tienen espesores aproximadamente de 20 cm, dispuestos en soga y machones de ladrillo.



Figura 123. Muro construido en ladrillo unido con calicanto ó mortero pobre.

En el barrio por lo general, en las edificaciones de estilo republicano y ecléctico existe una mezcla de las unidades de mampostería en muros, debido a reformas tanto al interior como al exterior de las edificaciones.



Figura 124. Mezcla de unidades de mampostería.

Las edificaciones modernas están construidas en unidades de mampostería con un espesor de 15 cm, en ladrillo de arcilla cocido, dispuestos generalmente en soga unidos con morteros constituidos por cemento y arena. En la tabla siguiente se muestran las características tipológicas de cada uno de los estilos mencionados.

Tabla 23. Características constructivas de las edificaciones por estilo.

Tradición Colonial	Republicano	Ecléctico	Moderno popular
1. Muros en adobe y bahareque.	1. Muros en adobe hasta de 80 cm.	1. Muros en ladrillo hasta 20 cm.	1. Muros en ladrillo hasta 15 cm.
2. Cubierta en teja de barro y lamina de zinc.	2. Cubierta en teja de barro hasta 50 cm.	2. Cubierta en teja de barro.	2. Cubierta en teja de barro, losa o asbesto cemento.
3. Estructura de cubierta en madera rolliza.	3. Estructura de cubierta en madera rolliza.	3. Estructura de cubierta en madera rolliza.	3. Estructura de cubierta en madera aserrada o rolliza.
4. Puertas y ventanas en madera.	4. Puertas y ventanas en madera.	4. Carpintería metálica en puertas y ventanas.	4. Carpintería metálica en puertas y ventanas.
	5. En viviendas de dos pisos entrepiso de madera.	5. En viviendas de dos pisos entrepiso de madera.	5. En viviendas de dos pisos entrepiso de concreto.
	6. Elementos decorativos en materiales Arcillosos.	6. Machones de ladrillo	6. Acabados en yesos, arcillas, cementos y sintéticos.
	7. Barandas pilares y balaustres en madera.	7. Mortero de pega de la mampostería en argamasa o calicanto (cal+arena)	7. Mayor uso del vidrio.

En la inspección se pudo determinar que pos lo menos el 56 % de las edificaciones del barrio estan construidas con ladrillo cocido, un 35 % con adobe y al rededor de un 9 % de las edificaciones presenta combinación de estos materiales tanto en muros de cerramiento como interiores (ver figura 125).

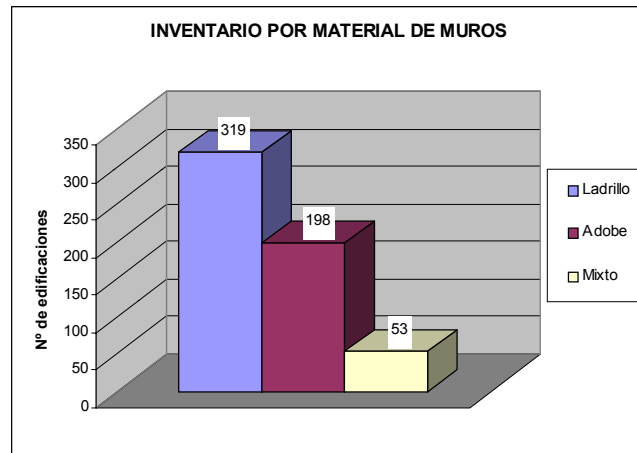


Figura 125. Distribución del inventario por material de muros.

En el barrio se pudo encontrar cubiertas en teja de barro, teja de zing, teja de asbesto cemento, losas de concreto aligerado y combinaciones de estas. Se pudo encontrar en la mayoría de edificaciones una tendencia bastante marcada por la teja de barro que caracteriza las edificaciones de tradición colonial al estilo de tradición colonial, republicano y eclectico, no escapando las de estilo moderno popular.

Se pudo establecer que la cubierta en teja de barro esta conformada en la mayoría de los casos por estructuras de madera rolliza, (algunas edificaciones han cambiando sus estructuras originales, por madera aserrada), el techo está conformado por un tendido de caña brava, chonta, amarradas algunas con alambres o clavadas, (muy pocas edificaciones aún conservan los amarres realizados con cuero de res) sobre el cual descansa

un tendido de tejas de barro que pueden tener dimensiones hasta de 50 cm.

La mayoría de estas edificaciones presentan aleros que protegen los muros de las inclemencias del clima.

Muchas de las edificaciones que tienen como sistema de cubierta la losa ó teja de asbesto cemento, corresponden a estilo moderno popular y las que tienen cubierta de zing corresponden generalmente a edificaiones de estilo de tradición colonial o republicana.

De los resultados del inventario como se muestra en el grafico, alrededor del 87 % de las edificaciones del barrio presentan cubierta de teja de barro; por lo menos el 7 % tienen como sistema de cubierta una losa; el 4 % presenta cubierta es teja de asbesto cemento comunmente llamada eternit; un d tiene cubierta de zinc 1 % y un poco mas del otro 1 % restante presenta una combinación por lo general en teja de barro+asbesto cemento (figura 126).

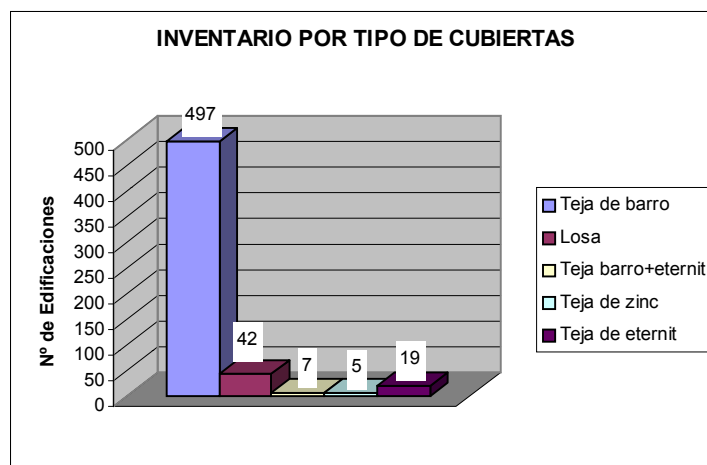


Figura 126. Distribución del inventario por tipo de cubierta.

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 rectificada 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 escapen 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 limite.

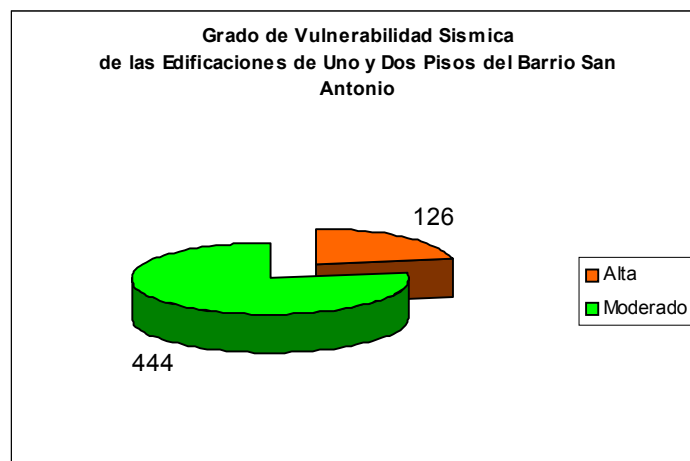


Figura 127. Grado de vulnerabilidad física-global

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, trabajo 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).

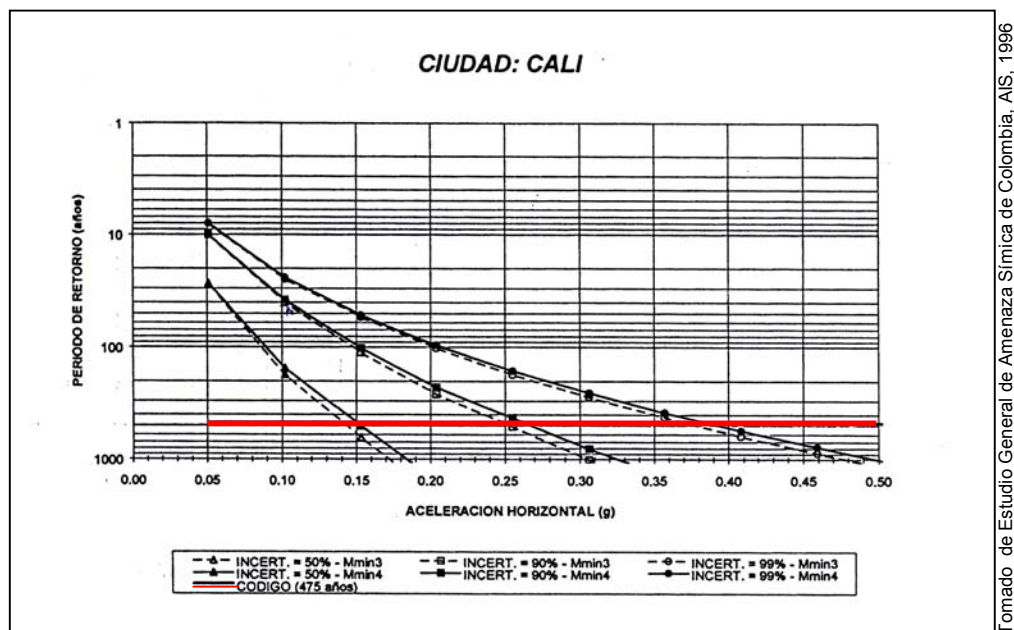


Figura 128. Curva de recurrencia de periodo de retorno de aceleraciones.

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).

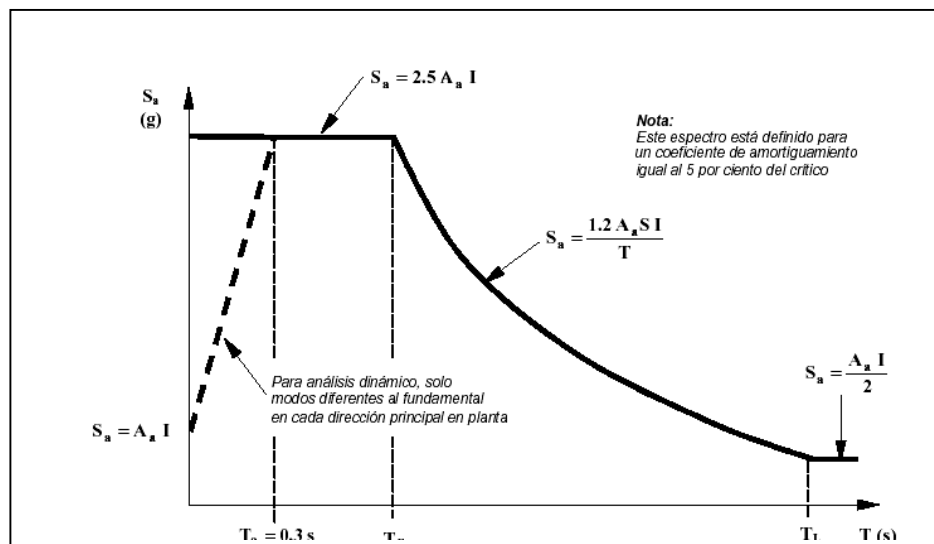


Figura 129. Espectro elástico de diseño NSR-98

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 la 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.

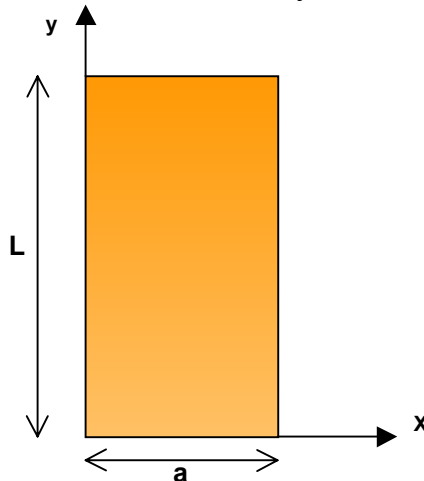


Figura 130. Direcciones principales de la edificación.

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 resultó ser para todas las edificaciones la dirección en el eje Y. Para este cálculo se tuvo en cuenta el valor del cortante resistente de los muros, que para 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 las 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. Cálculo 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 edificaiones de uno y dos pisos demampostería para los tres sismo hipótéticos planteados para el desarrollo de este trabajo. Estos se muestran en las figuras 131,132 y 133.

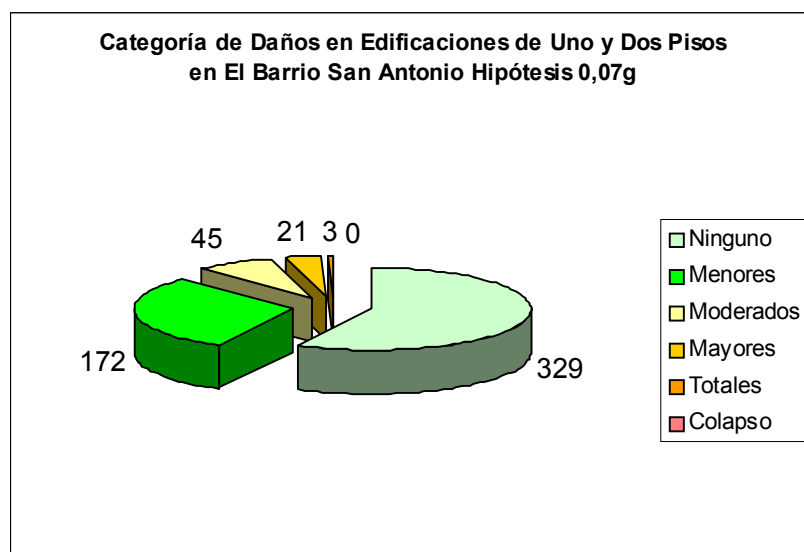


Figura 131. Distribución del daño sísmico para $A_a = 0,07 \text{ g}$

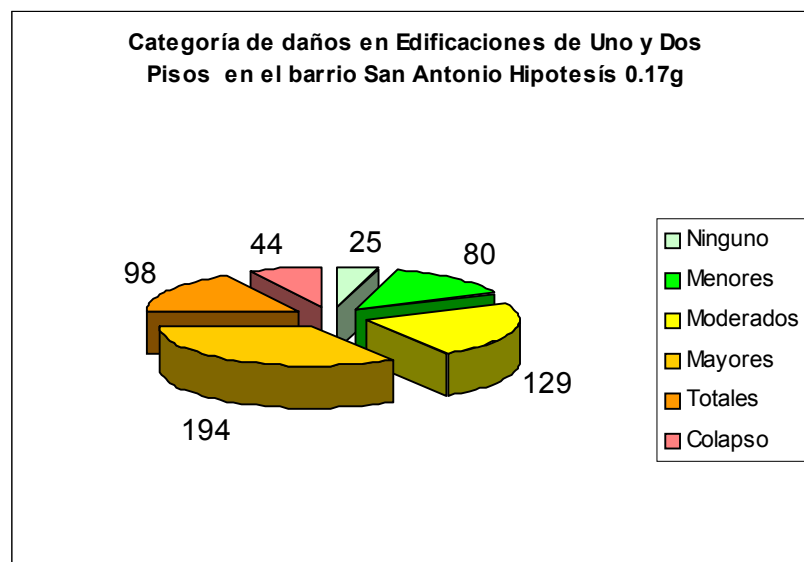


Figura 132. Distribución del daño sísmico para $A_a = 0,17 \text{ g}$

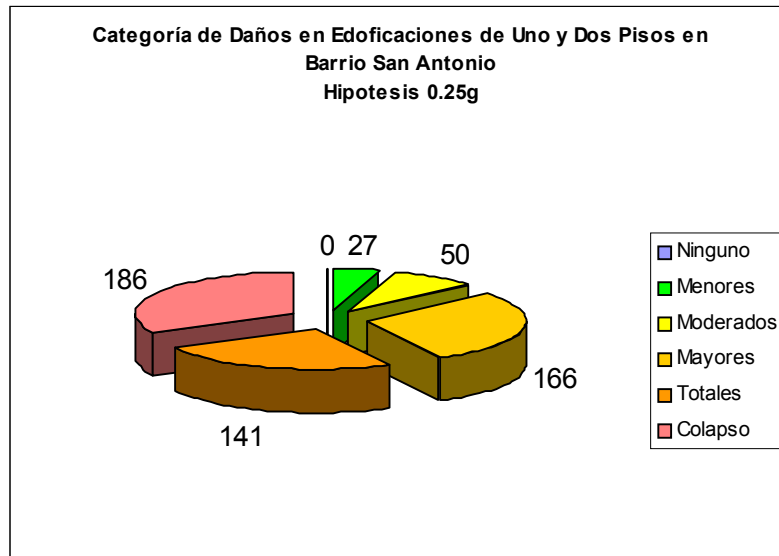


Figura 133. Distribución del daño sísmico para Aa 0,25 g

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 entrepiso: 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	Coeficiente 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

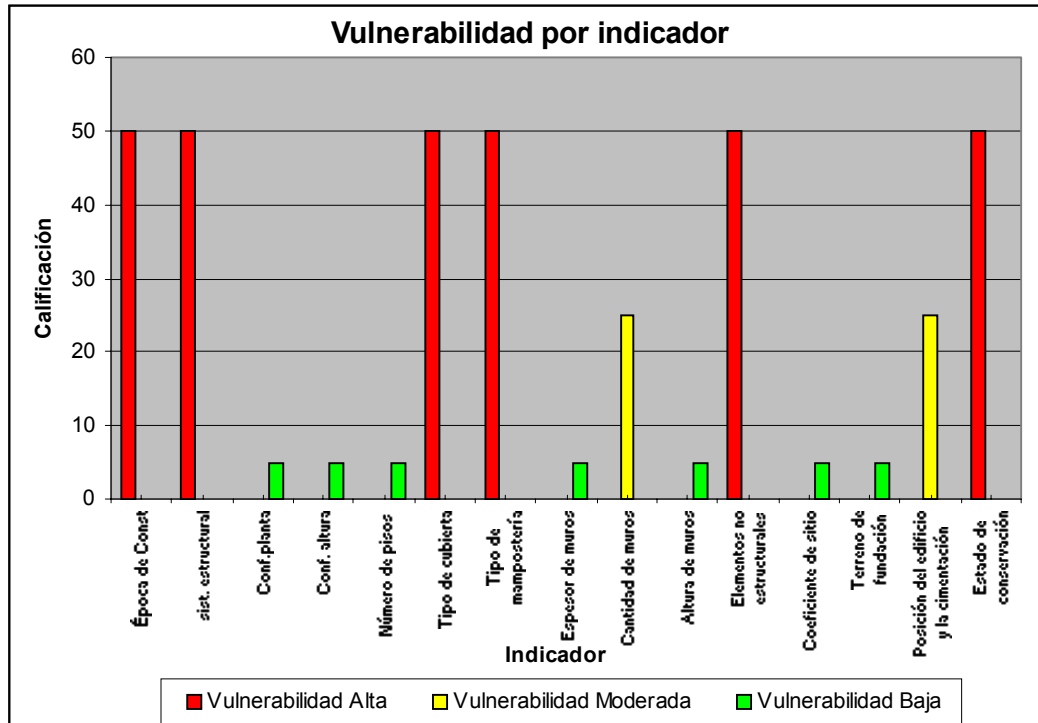


Figura 134. Comparación de la influencia de los indicadores de vulnerabilidad en la edificación.

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).

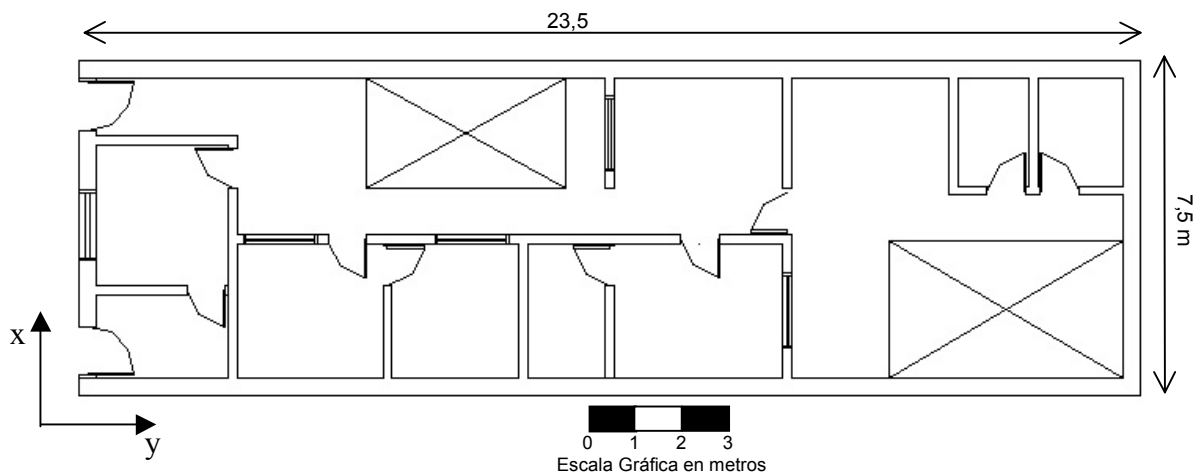


Figura 135. Planta arquitectónica de la edificación.

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/m²

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.

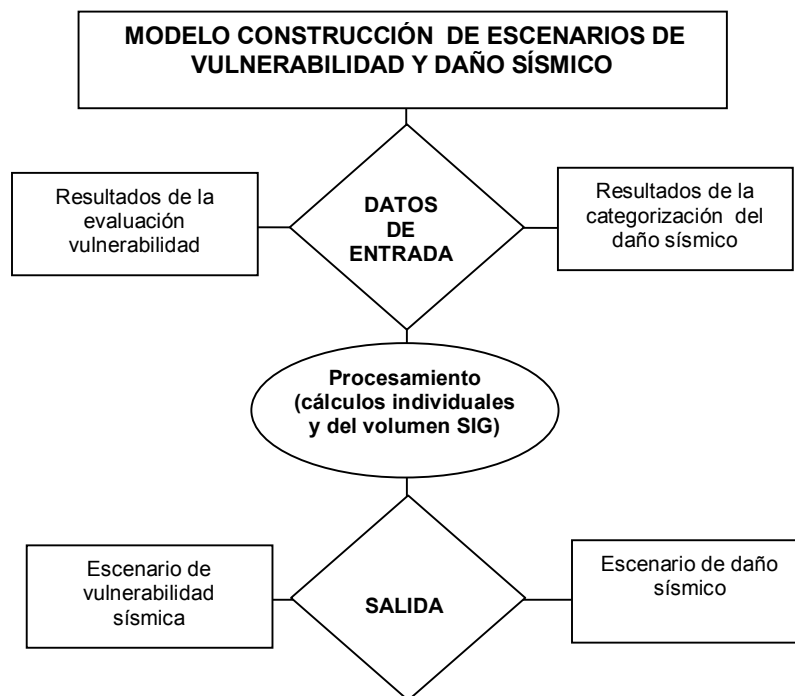


Figura 136. Elementos básicos para la determinación de escenarios.

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 en 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.

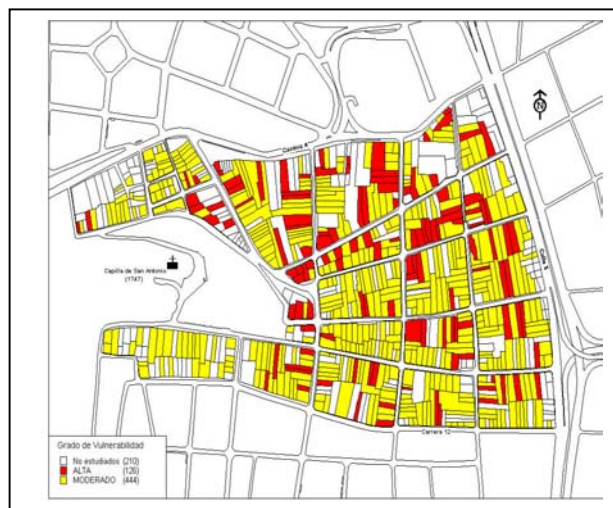


Figura 137. Representación gráfica de los resultados, elaborados en Mapinfo.

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.

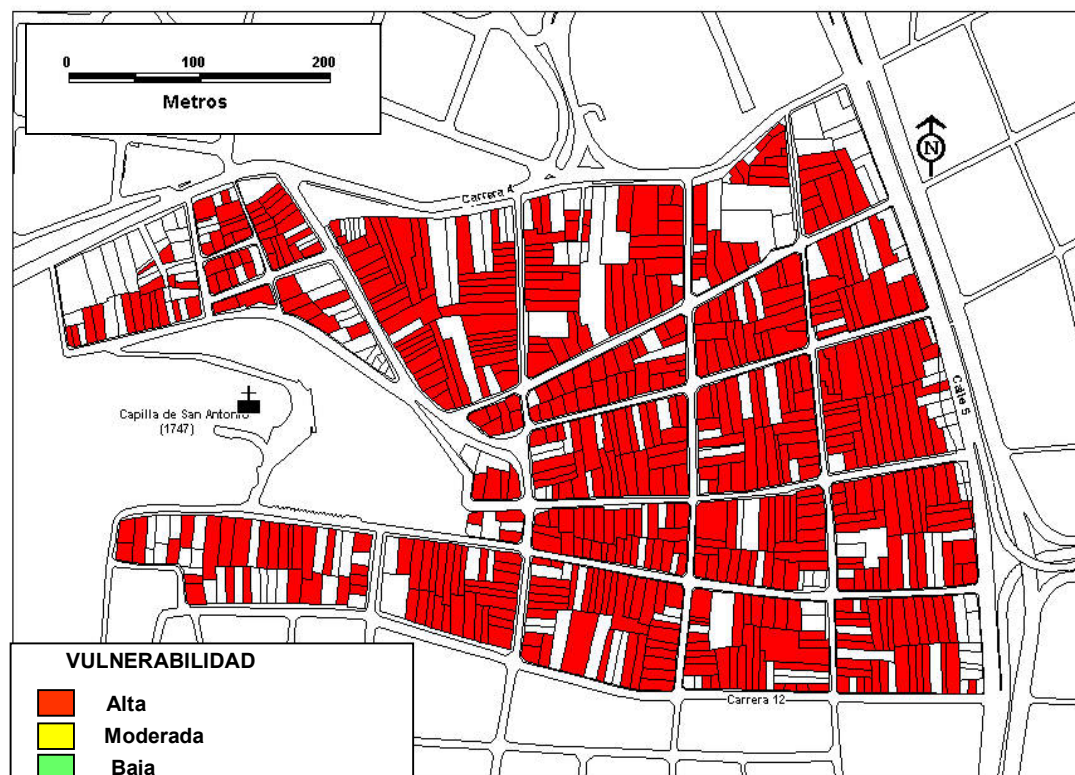


Figura 138. Indicador por época de construcción.

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.

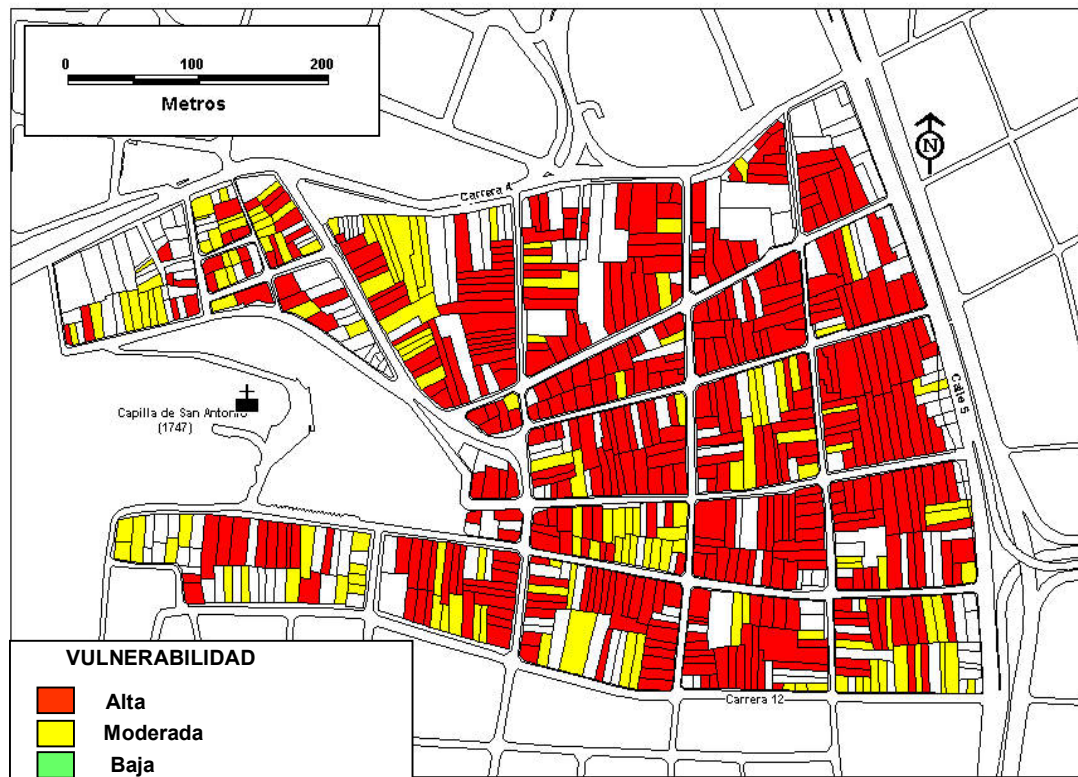


Figura 139. Indicador por sistema estructural.

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.

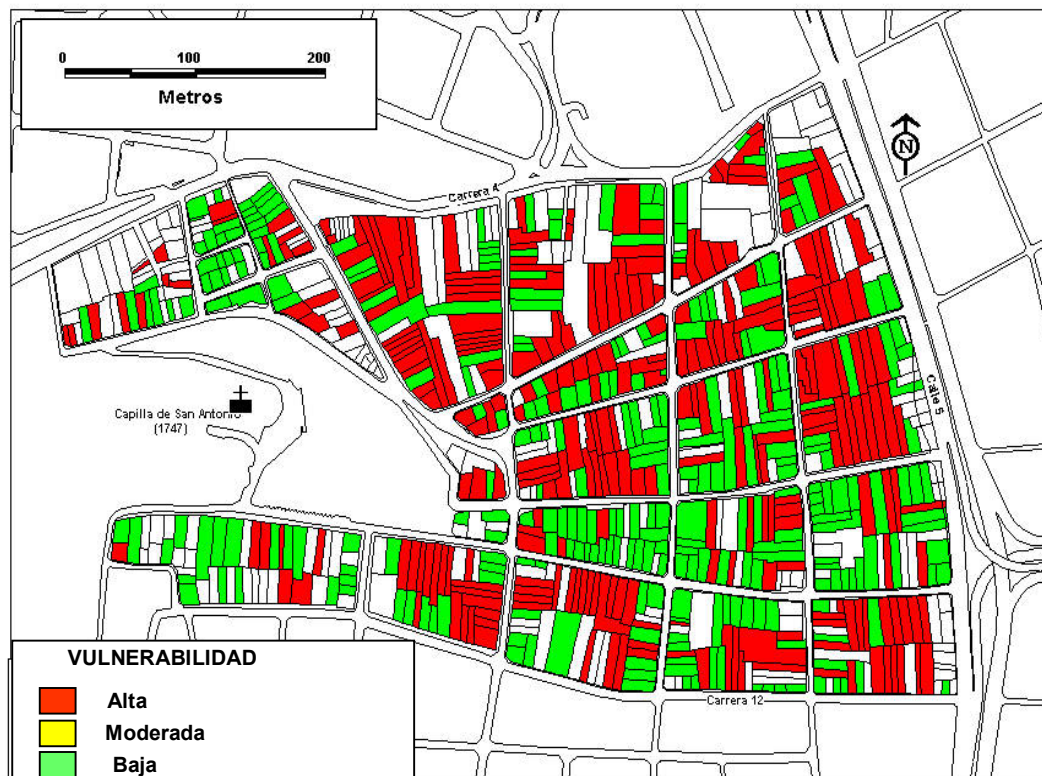


Figura 140. Indicador por configuración en planta.

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.

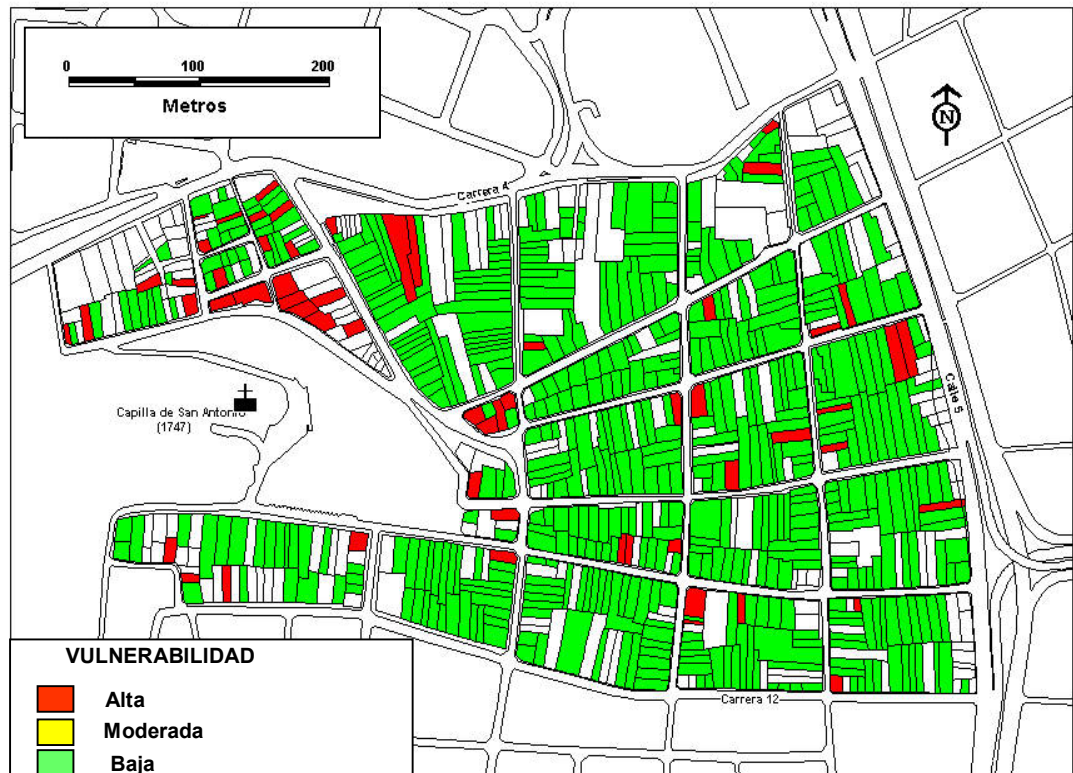


Figura 141. Indicador por configuración en altura.

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.

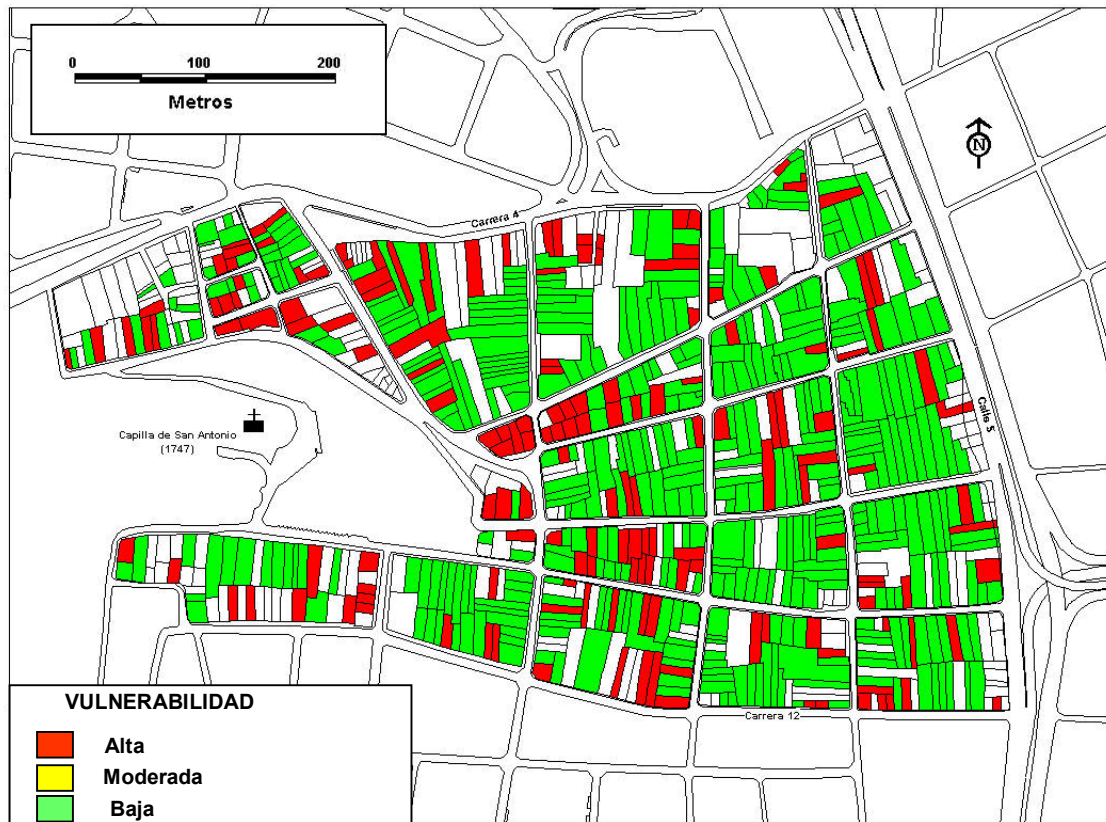


Figura 142. Indicador por número de pisos.

2. Tipo de cubierta.

Alrededor del 95 % de las edificaciones tienen cubierta pesada (un 8 % lo constituyen losas, 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.

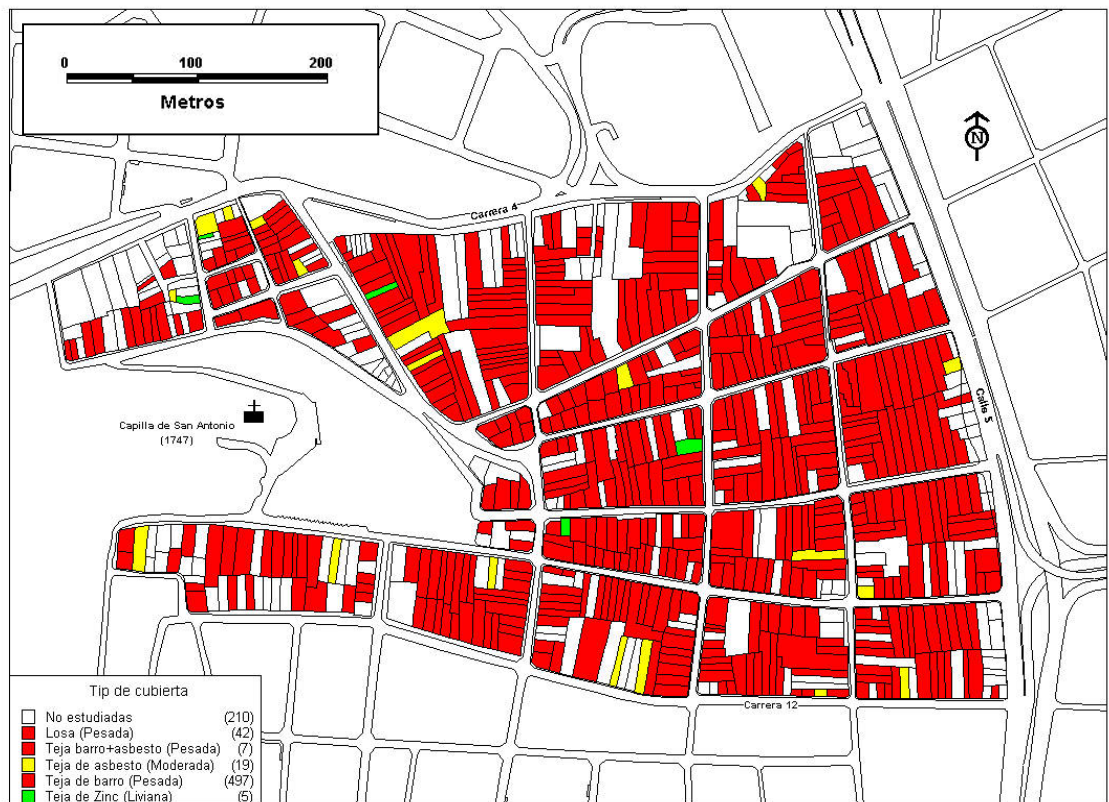


Figura 143. Indicador por tipo de cubierta.

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.

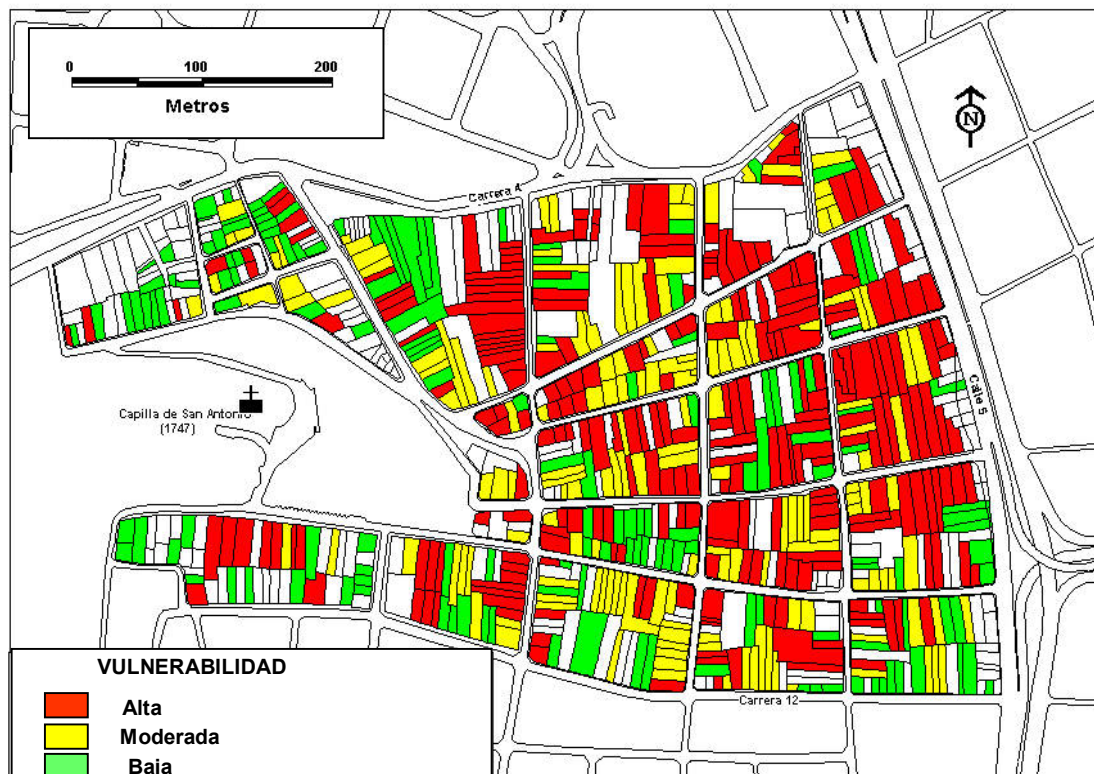


Figura 144. indicador por tipo de mampostería.

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.

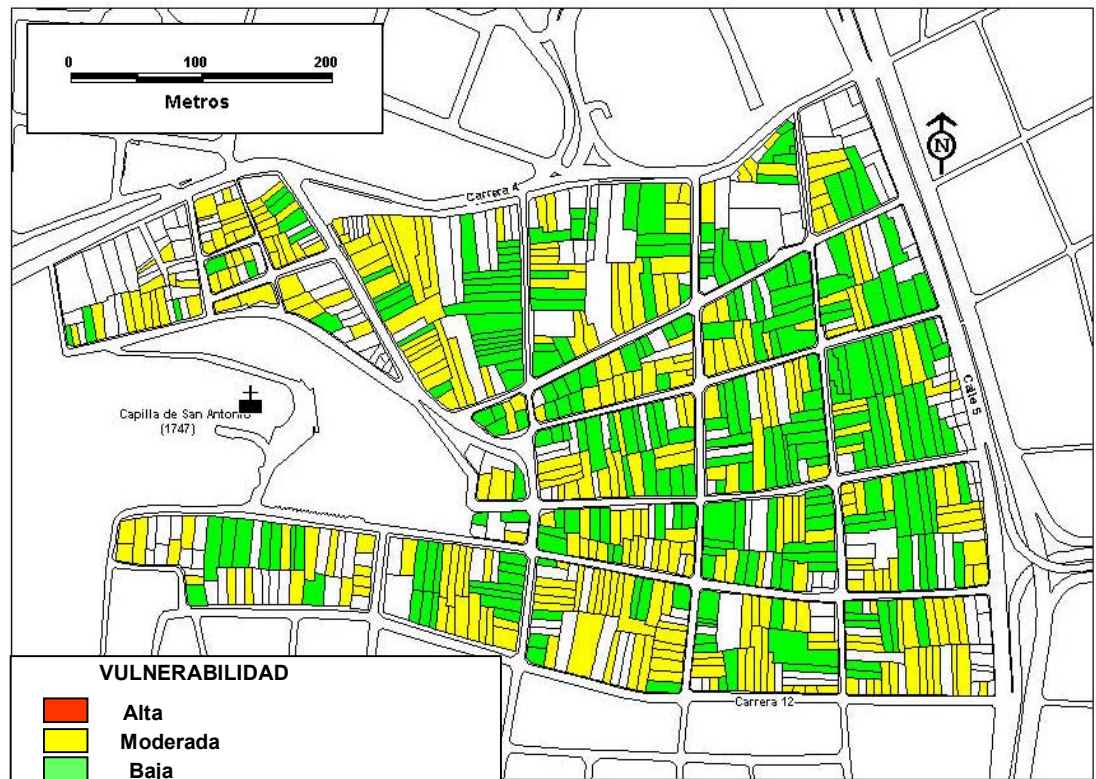


Figura 145. Indicador por espesor de muros.

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.

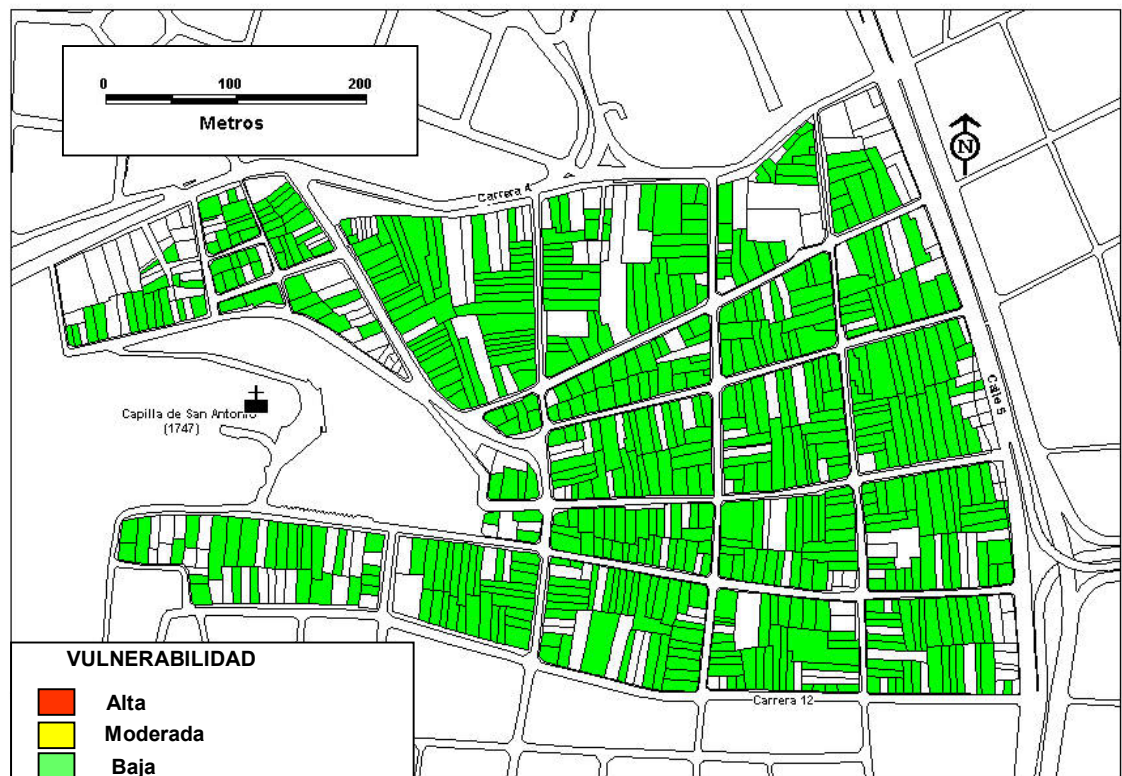


Figura 146. Indicador por altura de muros.

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.

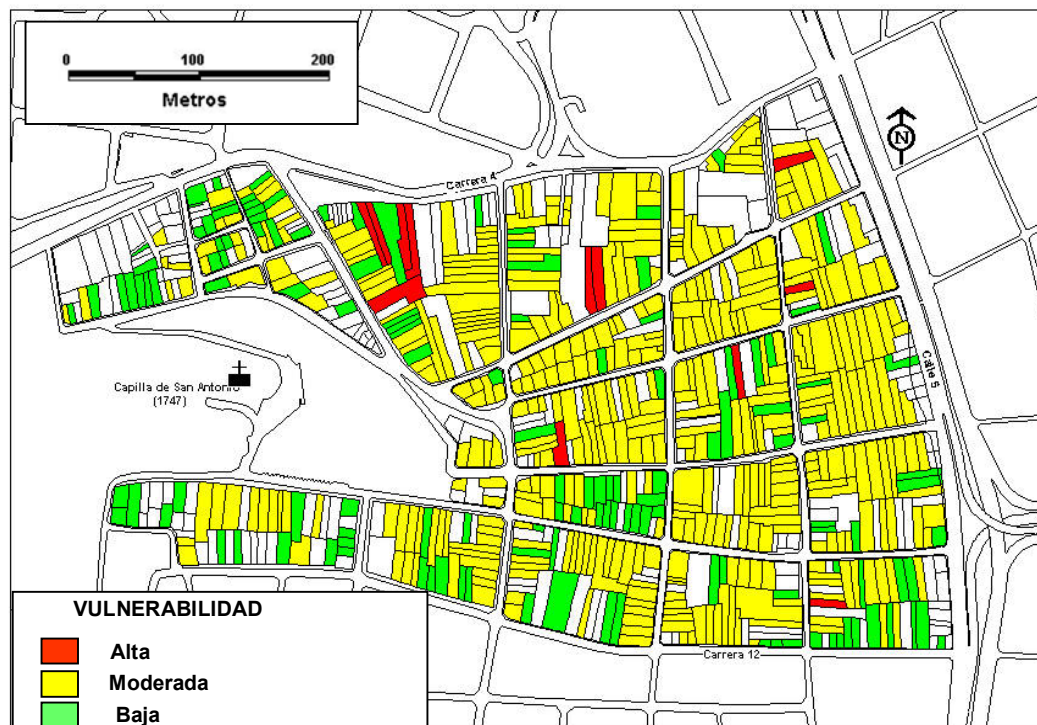


Figura 147. Indicador por cantidad de muros en las dos direcciones

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.

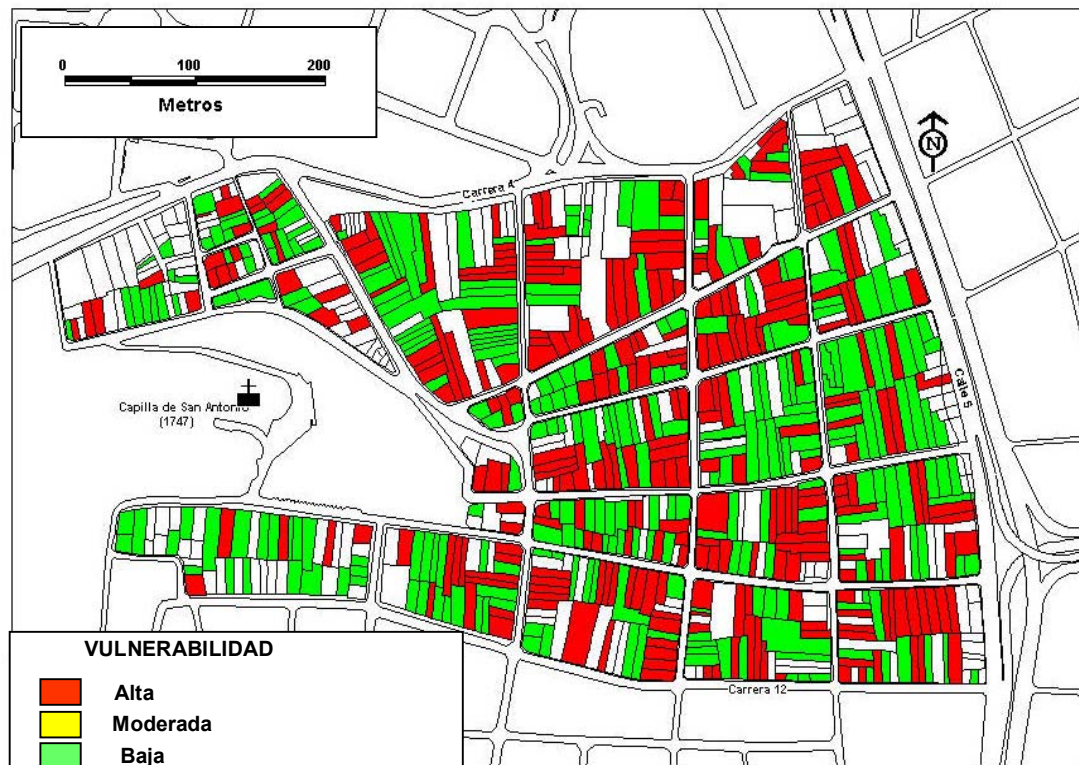


Figura 148. Indicador por elementos no estructurales.

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.

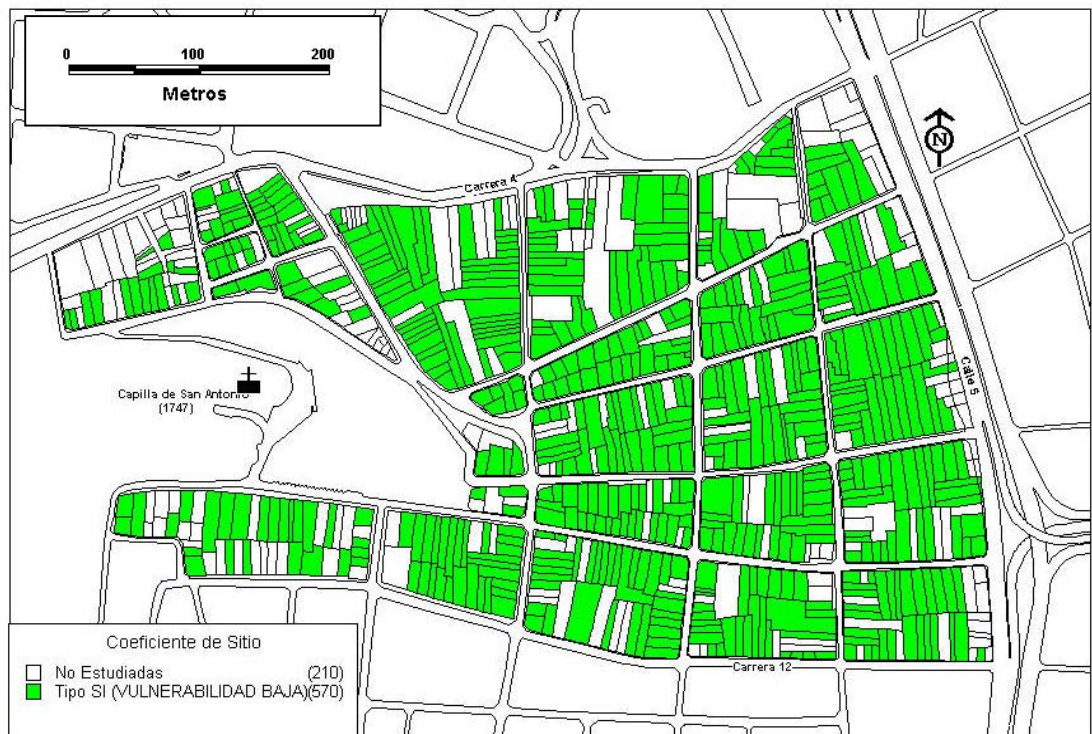


Figura 149. Indicador por coeficiente de sitio.

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.

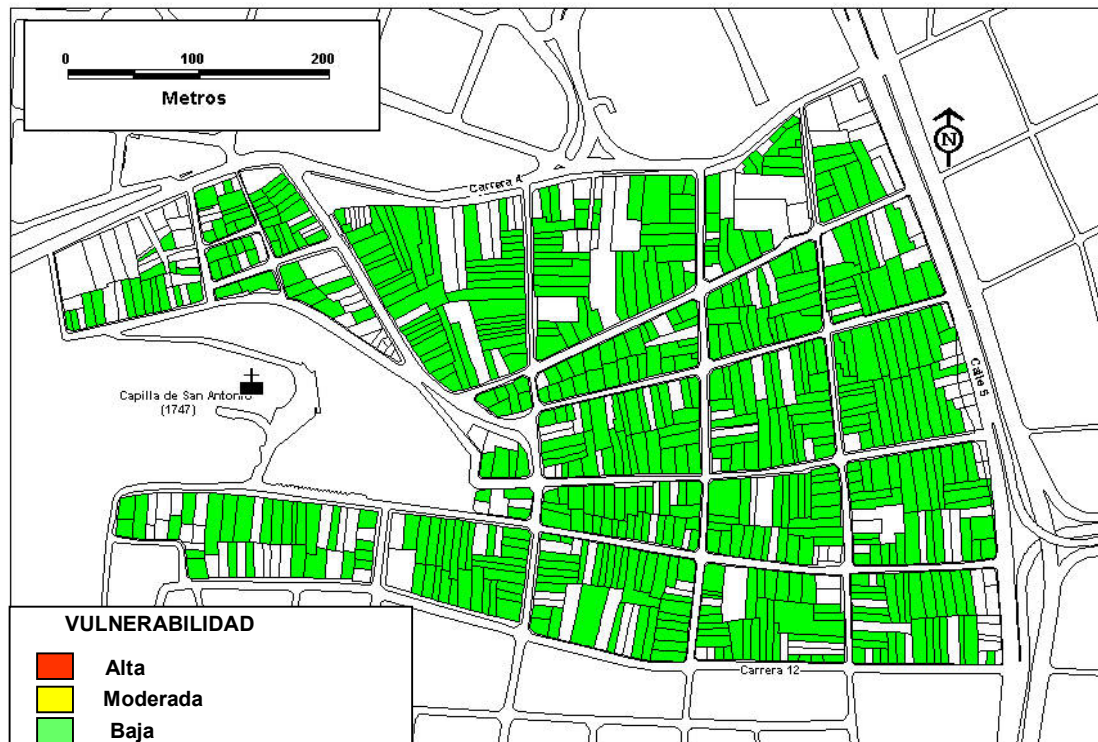


Figura 150. Indicador por terreno de fundación.

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**.

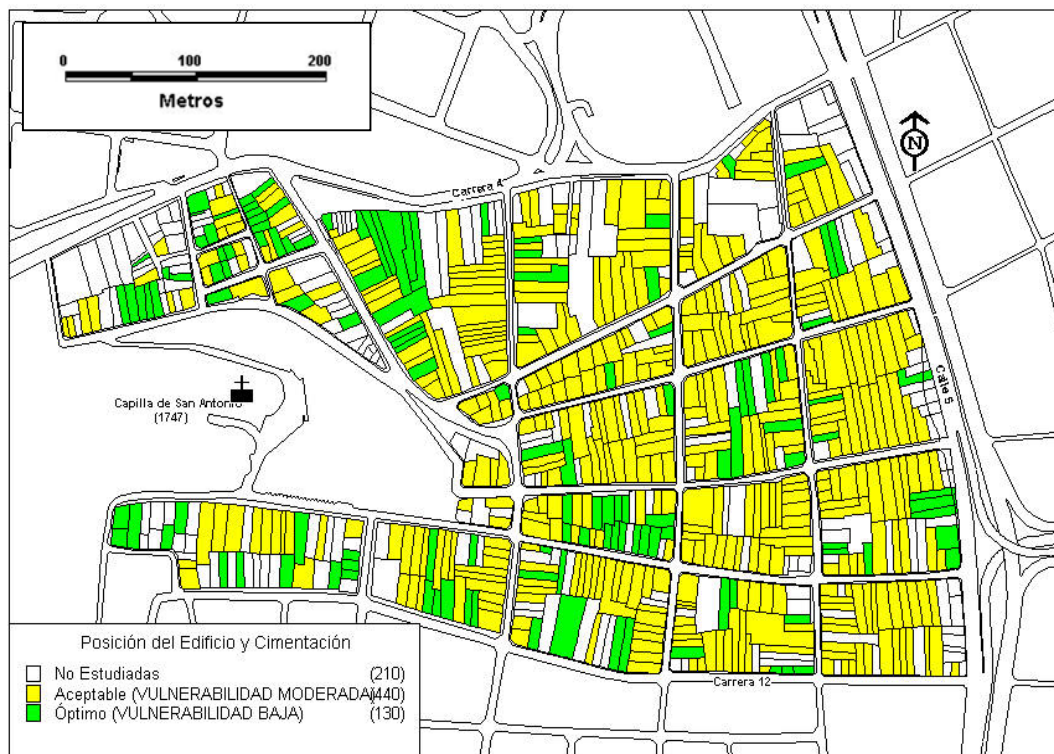


Figura 151. Indicador por posición del edificio y de la cimentación.

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.

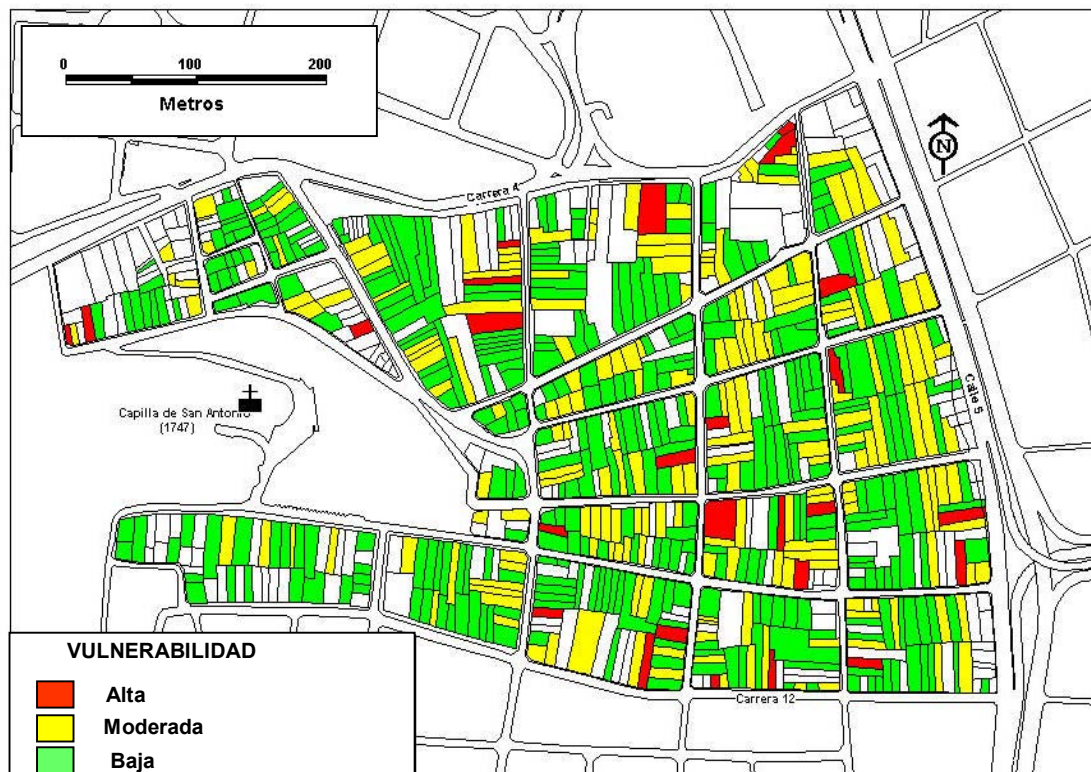


Figura 152. Indicador por estado de conservación.

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.

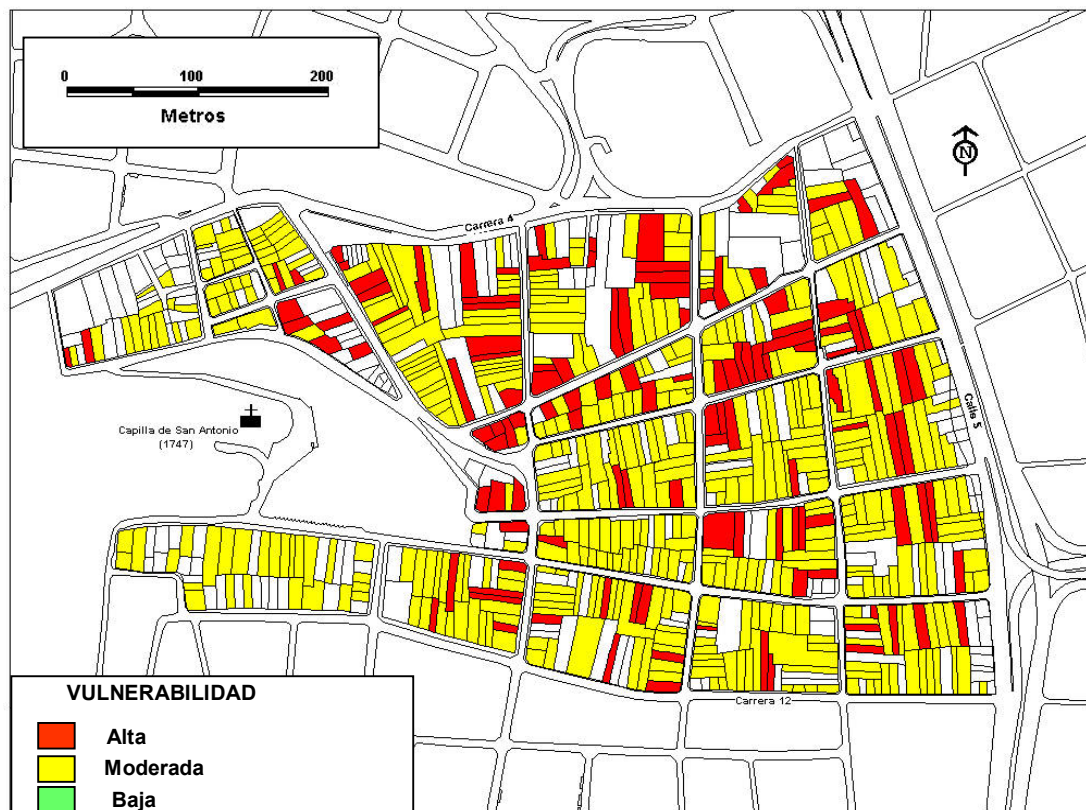


Figura 153. Vulnerabilidad física-global o del conjunto.

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 $A_a = 0.07 \text{ g}$.

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
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	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) 9. 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

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 CONSTRUDATA 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 CONSTRUDATA (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.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

9.1.1 Características arquitectónicas.

Se pudo observar que las edificaciones responden a una espacialidad que ha sido transformada, con algunas excepciones, hecho que ha incidido en el deterioro de los inmuebles generando una pérdida o alteración de su valor documental e histórico, contribuyendo con esto al incremento de la vulnerabilidad.

9.1.2 Estado de conservación.

Se puede concluir de acuerdo con las investigaciones realizadas para este estudio, que aunque se han realizado esfuerzos para la protección y recuperación, urbanística y arquitectónica del barrio, muchas edificaciones tienden a deteriorarse por el paso de los años, trayendo como consecuencia el aumento de la vulnerabilidad.

9.1.3 Causas de la vulnerabilidad.

El barrio San Antonio presenta una vulnerabilidad por origen debido a que la mayoría de las edificaciones se construyeron con técnicas tradicionales que no consideraban la sismo resistencia para su estructuración, así mismo, ha existido una vulnerabilidad progresiva debido a las transformaciones físicas de los inmuebles, que son el resultado del cambio de los aspectos sociales económicos y culturales que han influenciado el barrio desde su conformación.

9.1.4 Posibles causas de falla sísmica.

Se identificaron en la zona de estudio dos de las causas más comunes de vulnerabilidad sísmica, como lo son las cubiertas pesadas y la falta de confinamiento en muros, las cuales han ocasionado daños graves en edificaciones con características semejantes a las del barrio. Este hecho se evidenció en terremotos como el de Popayán 1983 y el de Cúcuta en 1981, entre otros. Por lo tanto, es muy probable que si ocurren movimientos con condiciones e intensidades similares, se presenten de nuevo este tipo de daños en las edificaciones del barrio.

9.1.5 Antecedentes de vulnerabilidad de la muestra analizada.

La experiencia aportada por terremotos pasados (Cúcuta 1981, Popayán 1983, Eje Cafetero 1999, entre otros), ha demostrado la susceptibilidad de las construcciones en mampostería no reforzada de adobe ó ladrillo cocido, a sufrir daños o pérdidas. Además, según la revisión de los efectos de sismos con efectos de gran incidencia, realizada para el presente trabajo, el

mayor número de víctimas de terremotos en América Latina, lo ha ocasionado el colapso de las edificaciones tradicionales, especialmente las de adobe y ladrillo.

Este antecedente es importante si se tiene en cuenta que de acuerdo con los resultados obtenidos de la evaluación de vulnerabilidad sísmica, se encontró que alrededor de un 75 % de las edificaciones estudiadas pertenecen a este grupo (edificaciones mampostería simple o no confinada), sistema que está expresamente prohibido en zonas de amenaza sísmica alta desde 1984, con la aparición del primer Código de Construcciones Sismo Resistentes en el país CCCSR-84, debido a su fragilidad y a la deficiente ductilidad para resistir las demandas sísmicas de un sismo moderado o severo. Es decir, que en caso de un evento sísmico, las edificaciones estudiadas podrían verse seriamente afectadas.

9.1.6 Características constructivas.

La mayoría de edificaciones presentan deficiencias constructivas a la luz de las actuales Normas de Construcción Sismorresistente. Este hecho se evidencia en el peso de la estructura de los techos y en la falta de amarres entre la cubierta y los muros. Así mismo, las cimentaciones no son las más adecuadas para soportar las cargas sísmicas; se presenta combinación de materiales en muros y elementos no estructurales, tales como cornisas, áticos, adornos y aleros que son susceptibles a caerse.

9.1.7 Características estructurales.

Se concluye que la mayoría de las edificaciones presentan deficiencias estructurales debido a la ausencia o parcialidad del confinamiento o reforzamiento lo que las hace más vulnerables frente a la acción sísmica.

9.1.8 Vulnerabilidad física-global o de conjunto.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la evaluación y con la suma de las calificaciones de los indicadores de vulnerabilidad sísmica en las edificaciones de 1 y 2 pisos del barrio San Antonio, construidas en mampostería (adobe y ladrillo), se pudo determinar una vulnerabilidad global, donde el 77 % de las edificaciones calificaron con **vulnerabilidad moderada**, y con **vulnerabilidad alta** calificaron el 23 %. Siendo las mas vulnerables las de dos pisos.

9.1.9 Indicadores que generan un mayor grado de vulnerabilidad sísmica.

Con base en las observaciones y el análisis realizados, los indicadores que tienen mayor incidencia en la calificación de la vulnerabilidad del Barrio San Antonio son de mayor a menor:

- Año de construcción
- Tipo de cubierta
- Configuración en planta

- Sistema estructural
- Elementos no estructurales vulnerables

9.1.10 Vulnerabilidad con respecto a la rigidez global de las edificaciones.

1. Tipo de Mampostería.

De acuerdo con los resultados obtenidos se llegó a la conclusión que las edificaciones con mayor grado de vulnerabilidad son las edificaciones construidas en mampostería de adobe, que corresponde al 35 % del total de las edificaciones analizadas, de las cuales el 87 % son de 1 piso, correspondiendo por lo general a edificaciones de tradición colonial y republicanas y un 13 % a edificaciones de 2 pisos, en su mayoría republicanas.

2. Cantidad de muros en las dos direcciones.

Por lo menos un 24 % de las edificaciones del barrio San Antonio presentan una adecuada distribución de muros en las dos dimensiones. De otro lado, la mayoría de las edificaciones, en un 74 % aproximadamente, presentan una buena distribución de muros en las dos direcciones lo que puede garantizar un comportamiento “en cajón” de la estructura portante, sin embargo, a pesar de esta ventaja se puede decir que esta situación se desmejora debido a la falta de elementos que le generen ductilidad a la edificación tales como vigas y columnas que los confinen, generando una vulnerabilidad moderada. El 2 % restante presentaría deficiencias en la mínima cantidad de

muros en una de sus dos direcciones, lo que genera una vulnerabilidad alta.

3. Espesor de muros.

Aproximadamente el 55 % de las edificaciones del barrio, están constituidos por muros con espesores entre 15 cm y 40 cm, lo que supera los mínimos espesores establecidos por la A/S (2001), para zonas de alta amenaza sísmica, calificando con una vulnerabilidad moderada, sin embargo, es posible encontrar en el barrio en un 45 % edificaciones con espesores de muros mayores a 40 cm, lo que en teoría podría asegurar un mejor comportamiento sísmico de la estructura frente a las deformaciones, generando una mayor rigidez.

4. Altura de los muros.

Se estableció que las alturas promedio de muros con relación al primer piso encontradas en edificaiones de estilo republicano y ecléctico está entre 4 y 6 metros y en las modernas una altura máxima de 3 metros. De acuerdo con lo anterior se determinó que en todas las edificaciones del barrio San Antonio, la altura de los muros está dentro de los limites especificados por la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (IAEE), donde se especifica que la altura del muro no debe ser mayor a 20 veces su espesor, lo cual garantiza en teoría un adecuado comportamiento frente a las deformaciones que se puedan presentar en un movimiento sísmico.

9.1.11 Vulnerabilidad con respecto al sistema estructural.

Se determinó que alrededor de un 75 % de las edificaciones no presentan ningún tipo de reforzamiento o de confinamiento, y corresponden en su mayoría a edificaciones de tradición colonial, republicana y ecléctica. Las edificaciones modernas, en su mayoría presentan un confinamiento parcial.

9.1.12 Vulnerabilidad con respecto al tipo de configuración geométrica.

1. Vulnerabilidad en planta.

Los resultados muestran que alrededor del 50 % de las edificaciones analizadas tienen irregularidad en planta, debido a la gran longitud que presentan los predios, con una relación superior a 3 veces el ancho del mismo. Esta característica se presenta con mayor frecuencia en edificaciones republicanas y eclécticas localizadas, la mayoría, en la zona baja y media del barrio. En la parte alta, donde predominan las edificaciones modernas, se observan predios con longitudes menores.

2. Vulnerabilidad en altura.

Alrededor del 90 % de las edificaciones son regulares en altura y corresponden, en su mayoría, a edificaciones de 1 piso. El 10 % restante corresponde a edificaciones modernas, en su mayoría de 2 pisos, las cuales presentan irregularidades en altura, como voladizos y altillos, entre otros. Esto debido a la mayor libertad estructural que trajeron consigo los

desarrollos constructivos en lo referente al hormigón armado, los cuales se incorporaron en la arquitectura moderna.

9.1.13 Vulnerabilidad con respecto al estado de conservación.

Se estimó que el 60 % de las edificaciones tienen un estado de conservación bueno, no obstante, un 35 %, aproximadamente, tienen un grado de deterioro moderado, representado en patologías que se evidencian en deterioros en la estructura de cubierta, generalmente en los aleros y áticos con algunas deflexiones, así como humedades y pequeñas fisuras en muros. El 5 % de las edificaciones restantes presentan un estado de deterioro alto, que se manifiesta en patologías acentuadas en muros y cubiertas, que pueden ocasionar la falla de estas edificaciones.

9.1.14 Vulnerabilidad con respecto a los elementos no estructurales.

Aproximadamente un 50 % de las edificaciones del barrio San Antonio presenta elementos no estructurales vulnerables tales como áticos, cornisas, antepechos, y balcones, susceptibles a caerse y a generar daño. Estos elementos en su mayoría están presentes en edificaciones de estilo ecléctico y en algunas republicanas. El 50 % restante no presenta esta situación.

9.1.15 Vulnerabilidad con respecto al peso de las edificaciones.

1. Tipo de cubierta.

Se determinó que el 95 % de las cubiertas que conforman clasifican como pesadas, elemento que puede generar un efecto negativo sobre el comportamiento sísmico de las edificaciones. Por lo menos el 91 % corresponde a cubiertas de teja de barro y un menor porcentaje está representado en losas aligeradas de concreto y combinaciones de teja de barro y asbesto cemento. En un mínimo porcentaje se determinó que el resto de las cubiertas que conforman el barrio clasifican como moderadas (asbesto-cemento) y livianas (teja de zinc).

2. Número de pisos.

Se encontró que de las edificaciones de un piso las mas pesadas son de estilo republicano, seguidas por las de tradición colonial, eclécticas y, por último, las modernas que son las más livianas, este hecho se debe al tipo de material de muros, al tipo de cubierta y la área construida. Las edificaciones de 2 pisos más pesadas son las republicanas, seguidas por las eclécticas y, por último, las edificaciones modernas que son más livianas.

9.1.16 Vulnerabilidad con respecto al tipo de suelo y cimentación.

1. Terreno de fundación.

Se determinó que las edificaciones se encuentran sobre suelo firme, de

buena capacidad portante, que ha permitido que no se presenten asentamientos diferenciales importantes y que garantizan la estabilidad de las edificaciones.

2. Posición del edificio y la cimentación.

Más del 77 % de las edificaciones se localizan en una topografía con pendientes no mayores al 30 %, lo que sumado a la alta estabilidad del terreno pueden descartar empujes desequilibrados que comprometan los elementos constructivos que constituyen la cimentación. Sin embargo, debido a la antigüedad de muchas de las edificaciones y a las formas constructivas identificadas en la cimentación (cimentaciones en piedra), se puede decir que estas tienen deficiencias constructivas que podrían generar un mal comportamiento frente a las sollicitaciones sísmicas, debido a la falta de vigas de amarre.

El 23 % restante de las edificaciones están localizadas en zonas de pendiente mayores al 30 %, por lo general con sótanos hacia la zona del desnivel y que posiblemente pueden presentar deficiencias en su cimentación o deterioro por humedad.

3. Coeficiente de Sitio.

Se puede concluir de acuerdo con las investigaciones geotécnicas y características dinámicas de los depósitos de suelo de la zona de estudio, se descarta la posibilidad de que se presente amplificación sísmica de orden geológico, lo cual favorece a las edificaciones del barrio San Antonio. No

obstante, del estudio de microzonificación sísmica se pueden obtener resultados más específicos al respecto, como el efecto topográfico que no se conoce.

9.2 RECOMENDACIONES

9.2.1 Ampliar el universo de estudio de edificaciones en el barrio.

Debido a que la metodología desarrollada para la estimación de la vulnerabilidad sísmica del barrio San Antonio fue diseñada para ser aplicada a gran escala a este sector urbano y que se restringe a viviendas de mampostería de uno y dos pisos, es pertinente que se realicen estudios de vulnerabilidad al resto de las edificaciones que no fueron analizadas en orden de prioridad (edificaciones de más dos pisos) presentando un especial interés por las edificaciones destinadas para albergar a un gran número de personas, tales como centros educativos, teatros, iglesias entre otros., de acuerdo con lo estipulado en la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR-98 (Capítulo A-10 *"Edificaciones Construidas Antes de La vigencia de la Presente Versión del Reglamento"*).

9.2.2 Refinamiento del estudio de vulnerabilidad sísmica del barrio San Antonio.

Debido a que el método utilizado para el diagnóstico de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de 1 y 2 pisos del barrio San Antonio, está basado en apreciaciones subjetivas, se recomienda a partir de los resultados obtenidos en este estudio como una primera aproximación, desarrollar trabajos con un mayor grado de detalle y refinamiento, a las edificaciones prioritarias y/o a las edificaciones representativas de las tendencias arquitectónicas que componen el barrio, en donde se involucren ensayos de

laboratorio de materiales y modelamiento de las estructuras de estas edificaciones, con el fin de evaluar con precisión los parámetros físicos que las hacen vulnerables y de esta manera plantear propuestas de reforzamiento.

9.2.3 Considerar el efecto topográfico.

De acuerdo con los antecedentes mostrados en el presente trabajo sobre la incidencia del efecto topográfico en los daños sufridos en construcciones localizadas en zonas con topografía irregular, como colinas, sería importante adelantar estudios conducentes a determinar la posibilidad que se presente este tipo de fenómeno de amplificación sísmica. No obstante, se presenta una baja incidencia del efecto de sitio, por amplificación sísmica en los depósitos de suelo del barrio, según los ensayos realizados por *Rosales* (2001).

9.2.4 Conservación integral del conjunto patrimonial.

Se pudo constatar como los estudios del barrio y los planes de conservación y recuperación se han enfocado más hacia el aspecto arquitectónico y urbanístico, es decir, que sería muy importante, en búsqueda de una conservación integral del conjunto patrimonial, la implementación, en primera instancia, de estudios más detallados que permitan un refinamiento de la información en lo concerniente a la vulnerabilidad sísmica, y posteriormente, la generación de un programa de reforzamiento o consolidación, para la conservación de los inmuebles y de la vida de sus habitantes.

En ese sentido, teniendo en cuenta que las edificaciones de adobe son las más vulnerables, además de representar buena parte del valor patrimonial del sector, se recomienda tener en cuenta las experiencias sobre reforzamiento de edificaciones de adobe desarrolladas en Colombia (si existen) o en países como Perú y Ecuador donde las construcciones de adobe continúan teniendo gran vigencia entre la población como solución habitacional.

Entre estas experiencias se encuentra el programa del Centro Regional de Sismología para América del Sur, *CERESIS* (2001), denominado “Reforzamiento Sismo-Resistente de Viviendas de Adobe Existentes en la Región Andina”, el cual está disponible en la pagina web: [http:// sipan.inictel.gob.pe/ceresis/ proyect /adobe.htm](http://sipan.inictel.gob.pe/ceresis/proyect/adobe.htm), proyecto que fue seleccionado para su aplicación a nivel mundial como uno de los proyectos demostrativos del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales 1990-1999 de las Naciones Unidas.

En lo referente a las edificaciones de ladrillo cocido, se recomienda consultar el “Manual de Construcción Evaluación y Rehabilitación Sismo resistente de Viviendas de Mampostería”, desarrollado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica *A/S* (2001), el cual se puede encontrar en la siguiente página web: <http://www.desenredando.org>.

9.2.5 Evaluar la vulnerabilidad sísmica de las líneas vitales.

Se recomienda realizar estudios de evaluación de vulnerabilidad sísmicas de las líneas vitales como las redes de acueducto, alcantarillado, energía, teléfono etc.

9.2.6 Herramienta para la planificación.

Con relación a los resultados propios de este proyecto, estos deben servir como una herramienta para la planificación, así como una base para diseñar y promover programas de prevención de desastres mediante la intervención de la vulnerabilidad, preparativos, campañas educativas y de información pública.

9.2.7 Estudios en otros sectores de la ciudad.

Incentivar la realización de proyectos de grado en el área del diagnóstico de la evaluación del riesgo sísmico de sectores urbanos, de manera que se vaya conformando una base de datos que puede ser útil para el desarrollo de un estudio de vulnerabilidad sísmica para Cali, con un menor grado de incertidumbre y con información más especializada. En el mismo sentido, los proyectos de grado que investiguen el aspecto geológico y geotécnico, pueden aportar datos valiosos para el estudio de estos aspectos, un ejemplo que corrobora lo pertinente de esta sugerencia, puede encontrarse en la “Zonación Sismogeotécnica de Medellín” (1994), donde las tesis de grado constituyeron gran parte de la bibliografía consultada.

9.2.8 Socialización de los resultados.

Es conveniente que los resultados de este trabajo sirvan para insentivar la participación comunitaria en el conocimiento de las fortalezas y debilidades encontradas por este estudio, en relación con la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, con el fin de que estos resultados puedan servir como herramienta o elemento de análisis para direccionar planes de mitigación.

Una de las formas de realizar la socialización de los resultados es por medio de la implementación de programas específicos a diferentes actores sociales, mediante la capacitación institucional, local y comunitaria.

9.2.9 Reducción de la vulnerabilidad.

Se recomienda implementar para la reducción de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones del barrio, medidas estructurales y no estructurales. Las primeras se refieren a actividades físicas referidas al reforzamiento estructural que consiste en ejecutar físicamente en las estructuras las recomendaciones dadas en una evaluación de la vulnerabilidad, al igual que el mejoramiento de la infraestructura y líneas vitales a partir de su mejoramiento o construcción de nuevas que cumplan con los requisitos especificados hoy en las normas colombianas.

Las medidas no estructurales corresponden a la planificación urbana a la capacitación e información pública, al fortalecimiento educativo a incentivos pro -reducción de riesgo y al cumplimiento de las normas urbanísticas y de construcción para el barrio.

9.2.10 Mantenimiento de las edificaciones.

Debido a las características tipológicas de las edificaciones, así como a su época de construcción, se recomienda desarrollar un programa de mantenimiento preventivo, con especial énfasis en la conservación de estructuras de cubierta, aleros, prevención y control de humedades en muros entre otros que se considere conveniente, para mitigar los efectos de las patologías que inciden en la vulnerabilidad sísmica.

De otro lado, considerando las intervenciones poco acertadas como adiciones, mutilaciones, demoliciones de muros, aperturas de vanos, etc., que se pudieron observar en muchas de las edificaciones del barrio, las cuales van en detrimento del valor patrimonial y de la resistencia sísmica, se recomienda brindar asesoría técnica a los propietarios de las edificaciones que deseen intervenir su inmueble.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. **AGUIRRE**, Ruiz Julio & **CASTANO**, Juan C. *El terremoto de San Juan de 1977*. Informe técnico preparado por la Misión Científica de la UNESCO-CERESIS. Lima, 1980.
2. **AIS**. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente*, NRS-98. "Ley 400 de 1997". Bogotá, 1998.
3. **AIS**. *Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación Sismo Resistente de Viviendas de Mampostería*. Bogotá, 2001.
4. **ALVARENGA**, Edwin R; **HERNÁNDEZ**, Douglas A; **HERNADEZ**, Daniel. A. *Escala de Intensidad Mercalli Modificada (MM)*. Centro de Investigaciones geotécnicas Ministerio de Obras Públicas de El Salvador.
5. **APRILE**, Gniset Jacques. *La Ciudad Colombiana: Prehispánica, de Conquista e Indiana*. Tomo I. Biblioteca Banco Popular. Cali, 1991.
6. **ARANGO**, Silvia. *Historia de la Arquitectura en Colombia*. Editorial Escala. Bogotá, 1989.

7. **BARBAT**, Alex H. *Comportamiento Sísmico de Estructuras Antiguas*. VII Seminario Internacional y Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. AIS. Bogotá, 2001.
8. **BARNEY**, Caldas Benjamín, & **RAMÍREZ**, Potes Francisco. *Arquitectura en el Valle del Cauca*. Revista Planta libre N°1, Facultad de Arquitectura, Universidad del Valle. Cali 1988.
9. **BARNEY**, Caldas Benjamin. *De Santiago de Cali a Cali; Tradición, modernización y Crecimiento*. Revista CITCE N° 2. Universidad del Valle. Cali 1999.
10. **BAZÁN**, Zurita Enrique, **MELI**, Piralla Roberto. *Manual de Diseño Sísmico de Edificios*. Editorial Limusa. México, 1985.
11. **BOESIGER**, Willy. *Le Corbusier*. Obras y Proyectos. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, 1993
12. **BOMMER**, Julián. *Sismología para Ingenieros*. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. 1994.
13. **BOMMER**, Julián. *Terremotos Urbanización y Riesgo Sísmico en San Salvador*. PRISMA. Salvador, 1996
14. **CAE**. Comité de Acción Ecológica. *El Sismo de Popayán*. Boletín N° 6. Univalle. 1983.

15. **CAICEDO**, César; **BARBAT**, A H. Alex; **CANAS**, A. José; **AGUIAR** Roberto. *Vulnerabilidad Sísmica de Edificios. Monografías de Ingeniería Sísmica*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería - CIMNE . Editor A.H. Barbat. Barcelona, 1994.
16. **CALERO**, Tejada Alvaro. *Cali Eterno, la Ciudad de Ayer y de Hoy 1983. Cali 450 años*. Cali, 1983.
17. **CAMPOS**, Ana & **JARAMILLO**, Juan Diego. *Vulnerabilidad Sísmica Urbana de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal*. CARDER. Pereira, 1999
18. **CAMPOS**, García Ana. *Mitigación del Riesgo Sísmico en Cali. "Programa de Mitigación de Desastres en Colombia"*. Informe Final - FASE I. Observatorio Sismológico del Sur Occidente. OSSO - Universidad del Valle. Cali, 1992.
19. **CAMPOS**, García Ana. *Mitigación del Riesgo Sísmico en Cali. "Programa de Mitigación de Desastres en Colombia"*. *Vulnerabilidad de Líneas Vitales*. Informe FASE II. Observatorio Sismológico del Sur Occidente. OSSO - Universidad del Valle. Cali, 1993.
20. **CARDONA**, Omar Darío. *Estudios de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo Sísmico, Planificación Física y Urbana en Áreas Propensas*. Cuadernos de Investigación CINDEC N° 14. Universidad Nacional de Colombia seccional Manizales. Manizales, 1988.

21. **CARDONA**, Omar Darío. *Evaluación Empírica de la Vulnerabilidad Sísmica Pre-evento*. Trabajos varios sobre vulnerabilidad sísmica. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS. Bogotá, 1989.
22. **CARDONA**, Omar Darío. *El Terremoto de Koceli, Turquía, del 17 de agosto de 1999*. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras. Vol. 4-2, 5-1, 23-48. Bogotá, 2000.
23. **CARDONA**, Omar Darío. *Estimación del Riesgo Sísmico Relativo de Santa Fé de Bogotá*. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras. Vol 4, N°1. Ecuador.1999.
24. **CARDONA**, Omar Darío. *Estudios de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo Sísmico, Planificación Física y Urbana en Áreas Propensas*. Cuadernos de investigación CINDEC N° 14. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, 1988.
25. **CARDONA**, Omar Darío. *Metodología para la Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones y Centros Urbanos*. Seminario Colombo-Alemán, Ingeniería Sísmica, Dinámica Estructural y Hormigón Armado. Universidad del Valle Cali, 1990.
26. **CARDONA**, Omar Darío. *Terremoto de Armenia, Colombia, Enero 25 de 1999*. Lecciones preliminares para la ingeniería sísmica y la prevención de desastres. Bogotá, 1999.
27. **CCC**. Cámara de Comercio de Cali. *Tertulias del Cali Viejo, Memoria*

Visual del Siglo XX. CD. Vol III. Cali, 2000.

28. **CERESIS**. *Reforzamiento Sismo-Resistente de Viviendas de adobe existentes en la región Andina*. Obtenido en al Red Mundial el 3 de Octubre de 2001: [http:// sipan.inictel.gob.pe/ceresis/proyect/adobe.htm](http://sipan.inictel.gob.pe/ceresis/proyect/adobe.htm).
29. **CHAVARRIA**, Lanzas Daniel A. & **GOMEZ**, Pizano Daniel. *Estudio Pilóto de Vulnerabilidad Sísmica en Viviendas de 1 y 2 Pisos del Barrio Cuarto de Legua en el Cono Cañaveralejo (Cali, Colombia)*. Cali, 2001. Tesis. Universidad del Valle.
30. **CHERUBINI**, et., al. *Vulnerability Assessment from Quick Survey Data in the Historic Centre of Catania*. Italia, 1998.
31. **CISMID**. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. *Guía Para la Construcción Sismo Resistente No Ingenieril*. Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica. Tokio, 1986.
32. **COLEGIO OFICIAL DE ARQUITECTOS**. *Curso de Patología Conservación y Restauración de Edificios*. Comisión de Asuntos Tecnológicos. España, 1991.
33. **CONSTRUDATA**. *Informática para la Construcción*. N.61, Cali Agosto-septiembre.1997.

34. **CONSTRUWEB.** *Metodologías Para Estudios de Vulnerabilidad Sísmica Estructural de Edificaciones Existentes.*
http://www.constru.web.co/Guias/Guia_Ingenieria_Estructu_MetVulnerab.htm. 1/12/01.
35. **CRUZ,** Aponte Noel. *EL Presente de la Arquitectura en Colombia: tipos arquitectónicos y proyecto moderno.* Revista Planta libre N°1, Facultad de Arquitectura, Universidad del Valle. Cali, 1988.
36. **CSIC.** *Seismic Risk Projects.* Obtenido de la Red Mundial el 16 de febrero de 2001: <http://dg.ija.csic.es/seismic.html>.
37. **DANE.** *Índices de Costos de la Construcción en Vivienda.* Variaciones Porcentuales 1990-2001. Obtenido en la red mundial el 11 de enero de 2002.
http://www.dane.gov.co/Información_Estadística/Estadísticas/Indices_y_Costos/ICC/iccv/body_iccv.html.
38. **DAPM.** Departamento Administrativo de Planeación Municipal. *Plan de Ordenamiento Territorial.* Documento Resumen. Cali, 2000.
39. **DAMP.** Departamento Administrativo de Planeación Municipal. *Plan para la Mitigación de Riesgos en Cali.* Cali, 1996.
40. **DEFENSA CIVIL DEL TACHIRA.** *Escala de Intensidad de Mercalli*

Modificada Según Charles Richter (1958). Información sobre el último movimiento sísmico. Obtenido en la red mundial el 12 de Julio del 2001. <http://www.geocities.com/dc-tachira/sismo1.htm>.

41. **ESCOBAR** et al. *Evaluación del Sistema Constructivo con Adobe en el Barrio San Antonio.* Cali, 1998. Tesis Universidad del Valle.
42. **ESPINDOLA**, E. Castro & **JIMÉNEZ**, Zenón. *Terremotos y Ondas Sísmicas, una Breve Introducción.* Instituto de Geofísica, Universidad Autónoma de México UNAM. Obtenido en la red mundial el 20 de marzo del 2001: <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>.
43. **ESPINOSA**, Silva Augusto. *Dificultad del Refuerzo Anti-sísmico de Monumentos Históricos. "Informe Presentado en el Seminario Latinoamericano de Construcciones Sismo-resistentes de Tierra.* Lima, 1985.
44. **FERNÁNDEZ**, José Esteban. *Propuesta de Modelo Experimental para la Evaluación de la Vulnerabilidad de Sistemas Urbanos en Zona Sísmica-Gran Mendoza-Argentina.* Unidad Riesgo Sísmico y Desarrollo Local-LAHV-INCIHUSA-CRICYT. Mendoza, 1987.
45. **FASECOLDA.** *Tarifas Incendios y Anexos 1977.* Encuentro interamericano de reaseguros. Puerto Rico, 1985

46. **GEOLOGICAL MUSEUM.** *Earthquakes.* Institute of Geological Sciences. Londres, 1983.
47. **GIRALDO,** V. José Luis. *Evolución Arquitectónica de Cali: Transformación Urbana de Cali Siglo XVIII- XIX.* Santiago de Cali 450 Años. Cali, 1992
48. **GIULIANO,** Mari; **GORI,** Roberto; **SÁEZ,** Samuel. *Estudio de Vulnerabilidad Sísmica de Viviendas de Adobe en La Zona de Coelemu (8ª Región, Chile).* XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Universidad de Concepción Chile. Chile, 2000.
49. **HARTKOPF,** Volkel. *Técnicas de Construcción Autóctonas del Perú.* Agencia para el Desarrollo Internacional. Washington, D.C, 1985.
50. **IGLESIAS,** Jesús. *Normas de Diseño Sismo Resistentes en América Latina: Limitaciones. Seminario Internacional de Planeamiento, Diseño y Administración de Hospitales en Zonas Sísmicas.* CISMID. Lima, 1989.
51. **INGEOMINAS.** *El Sismo de Popayán del 31 de marzo de 1983.* Bogotá, 1986.

52. **INGEOMINAS**. *Vulnerabilidad de Edificaciones*. Microzonificación Sismotectónica de Popayán. Santa fé de Bogota, 1992.
53. **INETER**. Observaciones de los Efectos del Terremoto del Salvador. Obtenido en la Red Mundial el 21 de Diciembre de 2001. <http://www.ineter.go.ni/geofísica/sis/com/salvador2001/efectos.html>.
54. **INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS**. *Megaciudades: Reduciendo la Vulnerabilidad a los Desastres*. Intermediate Technology Development Group - ITDG. Lima, 1999.
55. **JARAMILLO**, F. Diego Juan, **ORTEGA**, P. Cristina Diana. *Estudio del Riesgo Sísmico en Medellín*. Programa de Prevención Sísmica para Medellín. Universidad Eafit. Medellín, 1994.
56. **JIMÉNEZ** Juan, **PEÑAFIEL** Carmen, **CHÉRREZ** Marco, **YÉPEZ** F., **GARCÍA** E. *Aspectos Metodológicos Relacionados al Estudio de Vulnerabilidad Sísmica de las Edificaciones de Mampostería no Reforzada de la Ciudad de Cuenca*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca. Cuenca, 2000.
57. **LAGO**, Franco Manuel. *Construir el Espacio: Hitos de la Arquitectura Vallecaucana*. Enciclopedia Así es El Valle del Cauca. Publicación de El País. Cali, 1998.

58. **LENIS**, Burckhardt Alberto. *Retrospectiva Fotográfica del Valle del Cauca*. Cali, 1989.
59. **MASKREY**, Andrew, **ROMERO** Gilberto. *Urbanización y Vulnerabilidad Sísmica en Lima Metropolitana*. Centro de Estudios y Prevención de Desastres- PREDES. Lima, 1986.
60. **MENONI**, S; **PETRINI**, V; **ZONNO**, G. **ENV4-CT96-0279**. *Seismic Risk Evaluation Through Use of Geographical Information Systems and Artificial Intelingence Techniques*. SERGISAI. Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, Milano, Italy. Obtenido en la red mundial el 27 de enero de 2001. http://ade.irrs.mi.cnr.it/SERGISAI/Docs/PAPERS/Brux_97.html.
61. **MEYER**, Hansjürgen. *Proyecto Integral para la Mitigación del Riesgo Sísmico en Cali*. Memorias Seminario: Desastres Sísmicos en Grandes Ciudades "Enseñanzas en Mitigación y Operativos de Emergencia". Bogotá, 1990.
62. **MORALES**, Carlos, & **CASTRO**, Dicken. *El Legado de la Arquitectura Indígena*. Historia del Arte Colombiano. Editorial Salvat. Bogotá, 1975
63. **MUÑOZ**, Muñoz Harold A. *La Ciencia de la Patología Estructural*. Seminario de Reforzamiento y Rehabilitación de Edificaciones en Zonas Sísmicas. Pereira, 2000.

64. **MOSQUERA**, Torres Gilma & **APRILE**, Gniset Jacques *Clases, Segregación y Barrios*. Universidad del Valle. Cali, 1984.
65. **NAVA**, Alejandro. *Terremotos*. Fondo de cultura económica. Tercera edición. México 1998. obtenido en la red mundial el 5 de julio de 2000: http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/34/html/SEC_10.HTM.
66. **OPS**. Organización Panamericana de la Salud. Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de salud. Capítulo II.
67. **OSSO**. Observatorio Sismológico del SurOccidente. *Informe Preliminar, Sismo Enero 25 de 1999*. Universidad del Valle. Cali, 1999,
68. **PARRA**, Carlos H. *Estudio de Suelos Canal de Aducción Agua Cruda- Planta de Tratamiento Río Cali (San Antonio) EMCALI*. CPS Ingenieros. Cali, 1999.
69. **SMP**. Sociedad de Mejoras Públicas. *Plan de Recuperación Urbanístico y Arquitectónico del Barrio San Antonio 1998-2000*. Cali, 1998.
70. **QUINTERO**, Carlos E. **BARANDICA**, Giovanni. *San Antonio Pasado y Presente*. "Obra premiada en el concurso Recuerdos de Mí Barrio". Cali, 1984.

71. **RAMÍREZ**, Delgado Darío et al. *El Sistema financiero en la Reconstrucción de Popayán 1983-1988*. Banco de la Republica. Bogotá, 1989.
72. **RAMÍREZ**, Francisco et al. **CITCE**. Centro de Investigación en Territorio Construido y Espacio. *Arquitecturas Neocoloniales: Cali 1920-1950*. Universidad del Valle. Cali, 2000.
- 1.
73. **ROSALES**, Cristina. *Catálogo Sísmico de Sismos con Efectos en Cali, 1566 -2001*. Aproximación al Comportamiento Sísmico de las Ondas en los Suelos del Cono Cañaveralejo. Cali, 2001. Tesis. Universidad del Valle.
74. **ROSAS**, Bernal Martín. Construcciones Antisísmicas: La solución. En Periódico el Tiempo. Bogotá, 1989.
75. **SÁNCHEZ**, Francisco J. *Efectos de Sitio en Movimiento Fuerte del Terreno*. V Seminario Internacional Sobre Ingeniería Sísmica. Universidad de los Andes. Bogotá, 1989.
76. **SARRIA**, Molina Alberto y **BERNAL**, Carlos Eduardo. *Reporte de Campo Número Uno del Temblor de Cúcuta del 17 de Octubre de 1981*. AIS. Bogotá, 1982.
77. **SARRIA**, Molina Alberto. *Terremoto de México del 19 de Septiembre de 1985*. Compañía Central de Seguros. Bogotá, 1985.

78. **SOVERO**, M. Guillermo y **GUDIEI**, T. Demetrio, Instituto de Investigación UNSAAC - NUFFIC. *La Vivienda Reforzada de Adobe de Dos Pisos*. Perú, 1990.
79. **SOVERO**, M. Guillermo, Instituto de Investigación UNSAAC - NUFFIC. *La Investigación Tecnológica del Adobe en el Perú*. Perú, 1989.
80. **STEWART**, P. Jonathan. *Analysis Of Topographic Effects On Ground Motions At The Pleasants Valley Pumping Plant, California*. USGS. University of California. Obtenido en la red mundial el 21 de Diciembre de 2001. <http://erp-web.er.usgs.gov/reports/annsum/vol40/nc/g0038.htm>.
81. **SUAREZ**, Luis E. & **ARROYO**, Maria Elena. *Estudio Numérico de la Influencia de la Topografía Irregular en la Aceleración del Suelo Durante un Terremoto*. VII Seminario Internacional y I Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. AIS. Universidad de Los Andes. Bogotá, 2001.
82. **UNSAAC**. *Tecnología para Reparación de Viviendas de Adobe Dañadas por el Sismo*. Cartilla de difusión N° 3. Segunda edición corregida. Cusco, 1986.

83. **VARGAS**, A. Richard & **TAPIA**, M. Germán. *Gestión del Riesgo Sísmico en Ciudades*. VII Seminario Internacional y I Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Bogota, 2001.
84. **VÁSQUEZ**, Benítez Edgar. *Historia de Cali en el Siglo 20. Sociedad, Economía, Cultura y Espacio*. Cali, 2001.
85. **VÁSQUEZ**, Benítez Édgar. *Historia del Desarrollo Urbano en Cali*. Segunda edición. Universidad del Valle. Cali, 1982.
86. **VELÁSQUEZ**, Andrés & **MEYER**, Hansjürgen. *Ofertas y Amenazas Ambientales en Cali*. Publicaciones ocasionales del OSSO, N° 3. Cali, 1994
87. **VELÁSQUEZ**, Andrés. *Comparación de Riesgos (Perdidas Potenciales en tres Ciudades del Occidente Colombiano)*. Observatorio Sismológico del Sur Occidente OSSO. Universidad del Valle. Cali, 2001.
88. **VELÁSQUEZ**, Elkin et al. *Estudio de la Amenaza, Zonificación, Análisis y Vulnerabilidad Sísmica para Medellín*. Programa de Prevención Sísmica para Medellín. Universidad Eafit. Medellín, 1994.
89. **VIDAL**, Sánchez Francisco. *La Sorpresa del Terremoto de Kobe*. El Riesgo Sísmico. Prevención y Seguro. Consorcio de Compensación

de Seguros. Madrid, 2001.

90. **WAISMAN**, Marina. *El Interior de La Historia. Historiografía Arquitectónica para Uso de Latinoamericanos*. Editorial Escala. Bogotá, 1993.

91. **WILCHES**, Chaux Gustavo. *Herramientas para la Crisis - Desastres Ecologismo y Formación Profesional*. Popayán, 1989.

LISTA DE ABREVIATURAS

- CERESIS** - Centro Regional de Sismología para América del Sur.
- OSSO** - Observatorio Sismológico del Sur Occidente.
- AIS** - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- UNESCO** – Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura.
- CCC** - Cámara de Comercio de Cali.
- CIMNE** - Centro internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería.
- UNIVALLE** - Universidad de Valle.
- CISMID** - Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
- RSA** - Red Sísmica del Austro.
- DAPM** - Departamento Administrativo de Planeación Municipal.
- CARDER** - Corporación Autónoma de Risaralda.
- CCCSR-84** - Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (Decreto 1400 de 1984).
- EMCALI** - Empresas Municipales de Cali.
- UNDRO** - Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastres.
- ONAD** - Oficina Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.
- ATC** - Aplied Technology Council.
- FEMA** - Federal Emergency Management Agency
- OPS** - Organización Panamericana de la Salud.
- NSR-98** - Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente

Colombiana (Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998).

INGEOMINAS - Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras y Nucleares.

CVC – Corporación Autónoma del Valle del Cauca.

CERESIS – Centro Regional de Sismología para América del Sur.

DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística .

UNAM- Universidad Autónoma de México.

SMP- Sociedad de Mejoras Públicas de Cali.

UNSAAC – Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de resultados de pérdidas de vidas y materiales.....	12
Tabla 2. Comparación de índices relativos de riesgos	13
Tabla 3. Sismos con daños en Cali y sus fuentes sismogénicas.....	41
Tabla 4. Relación entre Intensidad y Magnitud según Richter (1958).	48
Tabla 5. Relación intensidad – aceleración.	49
Tabla 6. Matriz de vulnerabilidad sísmica de edificios de hormigón armado.....	190
Tabla 7. Matriz de calificación de la vulnerabilidad de edificaciones mampostería, método del índice vulnerabilidad.....	196
Tabla 8. Matriz de calificación de edificios de hormigón armado. método del Índice de vulnerabilidad	197
Tabla 9. Matriz de calificación de la vulnerabilidad método de Cardona. ...	198
Tabla 10. Matriz de calificación de índices de vulnerabilidad método <i>Velasco & Tassios</i>	201
Tabla 11. Factor de importancia de las edificaciones.....	202
Tabla 12. Matriz de calificación de la vulnerabilidad método AIS.	204
Tabla 13. Calificación de la vulnerabilidad del método argentino.....	205
Tabla 14. Matriz de calificación de vulnerabilidad método ISTC.	206
Tabla 15. Matriz de categoría de daños método de Hurtado.....	216
Tabla 16. Matriz de calificación de la vulnerabilidad método propuesto.....	231
Tabla 17. Matriz de calificación de vulnerabilidad física-global o de conjunto	231

Tabla 18. Valor de (M_o) para distintas aceleraciones (A_a)	245
Tabla 19. Espesor mínimo de muros en centímetros	249
Tabla 20. Edificaciones estudiadas por manzanas.....	260
Tabla 21. Características arquitectónicas de las edificaciones por estilos.....	268
Tabla 22. Características estructurales de las edificaciones por estilo.....	272
Tabla 23. Características constructivas de las edificaciones por estilo.	277
Tabla 24. Valores de S_a o CSE para las tres hipótesis de aceleración pico efectiva A_a	291
Tabla 25. Tipo de cubiertas y peso asociado	292
Tabla 26. Densidad de muros.....	292
Tabla 27. Causas de daño sísmico por estilos arquitectónicos	297
Tabla 28. Calificación de indicadores de vulnerabilidad	301
Tabla 29. Resumen resultados de daño sísmico.....	327
Tabla 30. Posibles causas de vulnerabilidad por estilos arquitectónicos. ..	332
Tabla 31. Área afectada según categoría de daños.....	334
Tabla 32. Cálculo de pérdidas económicas.....	335

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Marco tectónico regional	29
Figura 2. Mapa de sismicidad regional.....	31
Figura 3. Sismos con efectos en Cali.....	34
Figura 4. Iglesia La Ermita en Cali, destruida por el terremoto de 1925.	39
Figura 5. Localización de daños sísmicos en Cali.....	40
Figura 6. Efectos de daños sísmicos en el sector de fundación de la ciudad de Cali desde 1556 hasta el presente.	42
Figura 7. Propagación de las ondas sísmicas.....	51
Figura 8. Graves daños en edificaciones construidas en pendiente. terremoto de Iran 1968.	55
Figura 9. Componentes de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes.....	59
Figura 10. Vivienda construida en materiales de baja calidad.	60
Figura 11. Edificación de bahareque deteriorada en el barrio San Antonio.	61
Figura 12. Edificación con irregularidad en altura.	62
Figura 13. Edificación de tipo estructural de muros de carga no confinados.	63
Figura 14. Edificaciones sobre terrenos inestables, en el Eje Cafetero.	64
Figura 15. Formas sencillas y complejas en planta y en elevación.....	70
Figura 16. Edificación irregular en planta y altura.	70
Figura 17. Comportamiento sísmico de edificaciones.....	71
Figura 18. Edificación con piso flexible.	72
Figura 19. Viviendas construidas en materiales livianos.....	73
Figura 20. Vivienda en ladrillo, con cubierta de teja de barro, edificación	

relativamente pesada barrio Capri en la ciudad Cali.....	74
Figura 21. Asimetría estructural.	74
Figura 22. Distribuciones aceptables no simétricas con elementos del mismo material.	75
Figura 23. Continuidad y discontinuidad vertical de muros en una edificación.	76
Figura 24. Colapso de una edificación de bahareque por falta de estabilidad.	77
Figura 25. Pérdida de la capacidad portante del suelo por licuación, Nigata (Japón) 1964.....	78
Figura 26. Colapso de una edificación por deficiencias en su estructuración.	79
Figura 27. Colapso de una edificación por falta de confinamiento en el terremoto del 25 de enero de 1999 en el Eje Cafetero.	80
Figura 28. Colapso del hospital del Municipio de Córdoba Quindío, por deficiencias constructivas, terremoto del 25 enero de 1999 en el Eje Cafetero.	81
Figura 29. Edificio moderno de estructura aporticada.....	82
Figura 30. Falla en elementos estructurales mal conectados o diseñados. .	83
Figura 31. Vivienda en mal estado de conservación en el barrio San Antonio.	84
Figura 32. Vivienda en mampostería no confinada.....	88
Figura 33. Edificación de mampostería Confinada.....	88
Figura 34. Vivienda en mampostería reforzada.	89
Figura 35. Fisuramiento de muros portantes.....	94
Figura 36. Vivienda de adobe destruida por el terremoto de Arequipa de 2001.....	95

Figura 37. Vivienda en adobe con cimientos insuficientes.....	96
Figura 38. Deterioro de muros de adobe por humedad.	96
Figura 39. Avería en templos religiosos en Popayán debido al sismo del 31 de marzo de 1983.	97
Figura 40. Edificación con gran cantidad de vanos, afectada por el terremoto de Popayán el 31 de marzo de 1983	98
Figura 41. Vivienda de adobe, en el Perú, con deficiencias constructivas...	98
Figura 42. Falla típica de una construcción en adobe.....	99
Figura 43. Daño típico de una edificación de adobe dos pisos no reforzada.	99
Figura 44. Colapso de cubiertas pesadas en construcciones de adobe, debido al terremoto de Popayán del 31 de marzo de 1983.	100
Figura 45. Falla típica de colapso de cubierta en edificaciones de adobe.	100
Figura 46. Viviendas destruidas por el terremoto de San Juan, Argentina, en 15 de enero de 1944.....	101
Figura 47. Causas de falla típicas en edificaciones construidas en tierra.	101
Figura 48. Efectos del terremoto de Cúcuta en edificaciones populares ...	105
Figura 49. Viviendas de adobe afectadas por el terremoto del 31 de marzo de 1983 en Popayán.....	107
Figura 50. Bloques de Pubenza en Popayán.....	108
Figura 51. Colapso de un edificio moderna en Armenia, durante la replica de las 5:40 p.m el 25 de enero de 1999.	109
Figura 52. Colapso de una edificación moderna de construcción popular, terremoto del 25 de enero de 1999 en el Eje Cafetero.	110
Figura 53. Edificaciones de bahareque “Estilo temblorero” en el Eje Cafetero.	111
Figura 54. Esquema en planta y en altura de un bohío.....	121

Figura 55. Esquema en planta y en altura de un Caney	122
Figura 56. Viviendas coloniales Municipio de Villa de Leiva.	125
Figura 57. Morfología predial de la época de la conquista.	126
Figura 58. Vivienda construida en bahareque y techo de paja.....	128
Figura 59. Vivienda típica caleña con cubierta constituida por guaduas, en el barrio San Nicolás a finales del siglo XIX.....	129
Figura 60. Perfil de una calle del siglo XVIII.....	130
Figura 61. Características de una vivienda colonial	131
Figura 62. Desintegración del latifundio urbano y paso del solar al lote (1719 –1752).	132
Figura 63. Popayán a finales del siglo XIX y principios del XX.	133
Figura 64. Vivienda de tradición colonial en la zona de estudio.....	135
Figura 65. Edificación de estilo republicano en la zona de estudio.	138
Figura 66. Edificación ecléctica en la zona de estudio.....	140
Figura 67. Edificación moderna en el barrio San Antonio.	143
Figura 68. Panorámica del barrio San Antonio 1999.....	146
Figura 69. Localización del barrio.	147
Figura 70. Delimitación barrio.	148
Figura 71. Panorámica del barrio San Antonio en 1880.....	153
Figura 72. Vista de la antigua carrera 4 con calle 2, limite del barrio.....	153
Figura 73. Calle de San Antonio a finales del siglo. En el centro de la calle se observa el drenaje de aguas negras y lluvias XIX.	154
Figura 74. San Antonio a principios del siglo XX.....	154
Figura 75. San Antonio a finales del siglo XIX.	155
Figura 76. Panorámica del barrio San Antonio tomada entre 1920 y 1930.....	155
Figura 77. San Antonio en el año de 1925.....	156
Figura 78. Al fondo la colina de San Antonio en 1917. Foto tomada desde el	

río Cali.	156
Figura 79. San Antonio desde el barrio El Peñón en 1920.	157
Figura 80. La zona de "El Empedrado" en el año de 1935.	157
Figura 81. Panorámica del barrio San Antonio tomada entre 1920 y 1930	158
Figura 82. Colina de San Antonio en el año de 1960.....	159
Figura 83. Parte alta de San Antonio en el año de 1965.....	159
Figura 84. Calle del barrio en un día de “calle del arte”.	161
Figura 85. Sectores del barrio.....	163
Figura 86. Zona A - Carrera 4ª.....	164
Figura 87. Zona B – Calle 5ª.....	165
Figura 88. Zona C – Carrera 12.....	166
Figura 89. Zona D ó Central.....	167
Figura 90. Zona E- Colina de San Antonio.....	168
Figura 91. Zona F - Empedrado ó “Barrio Chino”.....	169
Figura 92. Zona G - Altos de San Antonio.	170
Figura 93. Capilla de San Antonio construcción colonial (1747) y Cámara de Comercio de Cali sede San Antonio.	172
Figura 94. Edificaciones estilo republicano.....	173
Figura 95. Edificaciones de estilo ecléctico.....	174
Figura 96. Edificaciones de estilo moderno- popular.	176
Figura 97. Edificaciones modernas de mas de tres pisos.	176
Figura 98. Mapa hipsométricos de Cali y el barrio.	177
Figura 99. Modelo de pendientes del barrio.....	178
Figura 100. Geología y coeficiente de sitio de la zona de estudio.	179
Figura 101. Corte estratigráfico ubicado en la Avenida Circunvalar, parte alta del barrio San Antonio	180
Figura 102. Conformación del suelo en el barrio San Antonio, Avenida	

Circunvalar.....	180
Figura 103. Corte estratigráfico ubicado en la parte alta del barrio	
Avenida Circunvalar.....	181
Figura 104. Corte estratigráfico localizado en la parte baja del Acueducto	
Municipal en límites con el barrio San Cayetano.....	181
Figura 105. Perfil S-1 de la NSR-98.....	182
Figura 106. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica.....	186
Figura 107. Clasificación de los métodos subjetivos.....	188
Figura 108. Clasificación de los métodos que predicen el daño.	189
Figura 109. Función de vulnerabilidad de edificaciones de mampostería. .	191
Figura 110. Función de daño sísmico	192
Figura 111. Métodos que evalúan la capacidad sísmica.....	192
Figura 112. Diagrama de determinación de la metodología.....	227
Figura 113. Distribución de alturas de edificaciones barrio San Antonio ...	258
Figura 114. Distribución espacial de manzanas estudiadas.	259
Figura 115. Población de edificaciones estudiadas.	261
Figura 116. Partes del formulario de recolección de datos en campo.....	266
Figura 117. Distribución del inventario por estilos arquitectónicos.....	269
Figura 118. Distribución del inventario por periodos de construcción	270
Figura 119. Distribución del inventario por número de pisos	271
Figura 120. Distribución del inventario por uso	271
Figura 121. Distribución del inventario por sistema estructural.	273
Figura 122. Detalle de un muro de adobe.....	275
Figura 123. Muro construido en ladrillo unido con calicanto ó mortero pobre.	275
Figura 124. Mezcla de unidades de mampostería.	276
Figura 125. Distribución del inventario por material de muros.	278

Figura 126. Distribución del inventario por tipo de cubierta.	279
Figura 127. Grado de vulnerabilidad física-global.....	283
Figura 128. Curva de recurrencia de periodo de retorno de aceleraciones.	288
Figura 129. Espectro elástico de diseño NSR-98.....	289
Figura 130. Direcciones principales de la edificación.....	293
Figura 131. Distribución del daño sísmico para $A_a = 0,07 \text{ g}$	298
Figura 132. Distribución del daño sísmico para $A_a = 0,17 \text{ g}$	298
Figura 133. Distribución del daño sísmico para $A_a 0,25 \text{ g}$	299
Figura 134. Comparación de la influencia de los indicadores de vulnerabilidad en la edificación.	302
Figura 135. Planta arquitectónica de la edificación.	304
Figura 136. Elementos básicos para la determinación de escenarios.	307
Figura 137. Representación gráfica de los resultados, elaborados en Mapinfo.....	308
Figura 138. Indicador por época de construcción.	310
Figura 139. Indicador por sistema estructural.	311
Figura 140. Indicador por configuración en planta.	312
Figura 141. Indicador por configuración en altura.....	313
Figura 142. Indicador por número de pisos.....	314
Figura 143. Indicador por tipo de cubierta.....	315
Figura 144. indicador por tipo de mampostería.....	316
Figura 145. Indicador por espesor de muros.....	317
Figura 146. Indicador por altura de muros.	318
Figura 147. Indicador por cantidad de muros en las dos direcciones	319
Figura 148. Indicador por elementos no estructurales.	320
Figura 149. Indicador por coeficiente de sitio.....	321

Figura 150. Indicador por terreno de fundación.	322
Figura 151. Indicador por posición del edificio y de la cimentación.....	323
Figura 152. Indicador por estado de conservación.	324
Figura 153. Vulnerabilidad física-global o del conjunto.	325
Figura 154. Daños hipotéticos con un sismo de 7% de g	328
Figura 155. Daños hipotéticos con un sismo de 17% de g.	329
Figura 156. Daños hipotéticos con un sismo de 25% de g	330

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

RESUMEN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 ANTECEDENTES	6
1.2.1 VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES	6
1.2.2 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO EN OTROS PAISES.....	9
1.2.3 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO EN COLOMBIA.....	11
1.2.3.1 Cali.....	11
1.2.3.2 Popayán.....	14
1.2.3.3 Medellín.....	15
1.2.3.4 Bogotá.....	16
1.2.3.5 Pereira.....	17
1.3 JUSTIFICACIÓN	18
1.3.1 PERTINENCIA DEL ESTUDIO.....	18
1.3.2 VULNERABILIDAD DE LAS EDIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN TRADICIONAL.....	19
1.3.3 REPRESENTATIVIDAD DEL BARRIO.....	20
1.3.4 ASPECTO PATRIMONIAL.....	21
1.3.5 HERRAMIENTA PARA LA PLANIFICACIÓN.....	22
1.3.6 HERRAMIENTA METODOLÓGICA PARA DIAGNOSTICAR LA VULNERABILIDAD	

SÍSMICA.	22
1.4 OBJETIVOS	23
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.	23
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	23
1.5 ALCANCES	24
1.6 LIMITACIONES	25
2. MARCO TEÓRICO	26
2.1 GENERALIDADES	26
2.2 CONCEPTOS GENERALES	27
2.3 AMENAZA SÍSMICA	29
2.3.1 SISMICIDAD HISTÓRICA.	32
2.3.2 CATÁLOGO MACROSÍSMICO.	33
2.3.3 ESCALAS DE MAGNITUD E INTENSIDAD.	43
2.3.3.1 Intensidad.	44
2.3.3.2 Magnitud	46
2.3.3.3 Relación entre Intensidad y Magnitud	47
2.3.4 DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS LOCALES.	50
2.3.4.1 Efecto de sitio por la geología.	51
2.3.4.2 Efecto topográfico.	52
2.3.5 AMENAZAS COLATERALES O EFECTOS DE SEGUNDO ORDEN	55
2.4 VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES	56
2.4.1 DEFINICIÓN.	56
2.4.2 CAUSAS DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA.	56
2.4.2.1 Vulnerabilidad por origen.	56
2.4.2.2 Vulnerabilidad progresiva.	57
2.4.3 COMPONENTES DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA.	58
2.4.3.1 Vulnerabilidad física.	59
2.4.3.2 Vulnerabilidad estructural.	59
2.4.3.3 Vulnerabilidad no estructural.	64
2.4.3.4 Vulnerabilidad funcional.	65
2.5 SISMO RESISTENCIA	66
2.5.1 DEFINICIÓN.	66
2.5.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.	66
2.5.3 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA SISMO RESISTENCIA.	68
2.5.3.1 Configuración geométrica.	69
2.5.3.2 Configuración estructural.	71
2.5.3.3 Bajo peso.	72

2.5.3.4	Mayor rigidez.	74
2.5.3.5	Buena estabilidad.....	77
2.5.3.6	Suelo firme y buena cimentación.	77
2.5.3.7	Estructura apropiada.....	79
2.5.3.7	Materiales competentes.	79
2.5.3.8	Calidad en la construcción.	80
2.5.3.9	Capacidad de disipar energía.	81
2.5.3.10	Fijación de acabados e instalaciones.	82
2.5.3.11	Estado de conservación de la edificación.....	83
2.5.4	DUCTILIDAD, DEFORMABILIDAD Y CAPACIDAD DE ABSORBER DAÑO.	84
2.5.4.1	Ductilidad.	85
2.5.4.2	Deformabilidad	85
2.5.4.3	Capacidad de absorber daño.....	86
2.6	CAUSAS DE DAÑO SÍSMICO EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA	87
2.6.1	CLASIFICACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA.....	87
2.6.1.1	Mampostería no reforzada.	88
2.6.1.2	Mampostería confinada.....	88
2.6.1.3	Mampostería reforzada.	89
2.6.2	FALLAS Y DAÑOS TÍPICOS DE CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA.	89
2.6.2.1	Causas de falla sísmica en viviendas de mampostería.....	90
2.6.3	DAÑOS TÍPICOS DE CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA.	93
2.6.3.1	Daños en elementos no estructurales.....	93
2.6.3.2	Daños en elementos estructurales (muros portantes).....	93
2.6.4	COMPORTAMIENTO TÍPICO DE LAS EDIFICACIONES EN ADOBE FRENTE A LOS SISMOS	94
2.6.4.1	Tipos de fallas de estructuras en tierra.	95
2.7	EFFECTOS DE SISMOS EN EDIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN TRADICIONAL	102
2.7.1	SISMO DE CÚCUTA 17 DE OCTUBRE DE 1981	104
2.7.2	SISMO DE POPAYÁN DEL 31 DE MARZO DE 1983.....	106
2.7.3	SISMO DEL EJE CAFETERO DEL 25 DE ENERO DE 1999.....	109
2.8	RIESGO SÍSMICO.....	111
2.8.1	EVALUACIÓN RIESGO SÍSMICO.	111
2.8.1.1	Evaluación de la amenaza sísmica.....	112
2.8.1.2	Identificación de los elementos expuestos.....	113
2.8.1.3	Evaluación del daño y funciones de vulnerabilidad.....	113
2.8.1.4	Estimación del riesgo sísmico específico.....	114
2.8.1.5	Estimación del riesgo sísmico total.	115
2.8.2	ESCENARIOS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA.....	116

2.8.3	ESCENARIOS DE DAÑO SÍSMICO.	116
2.8.4	CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS DE VULNERABILIDAD Y DAÑO SÍSMICO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO – SIG.	117

3. DESARROLLO URBANÍSTICO DE CALI Y SUS IMPLICACIONES EN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LAS EDIFICACIONES.

3.1	GENERALIDADES.	119
3.2	PERIODO PRE-HISPÁNICO	120
3.3	PERIODO COLONIAL	124
3.4	PERIODO REPUBLICANO	135
3.5	PERIODO DE TRANSICIÓN.	139
3.6	PERIODO MODERNO-CONTEMPORÁNEO.	140

4. EL CONTEXTO DEL BARRIO SAN ANTONIO

4.1	GENERALIDADES.	146
4.2	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	147
4.3	DELIMITACIÓN Y CRECIMIENTO HISTÓRICO.	148
4.3.1	DELIMITACIÓN.	148
4.3.2	CRECIMIENTO HISTÓRICO Y URBANÍSTICO	149
4.3.2.1	Siglo XVI.	149
4.3.2.2	Siglo XVII.	150
4.3.2.3	Siglo XVIII.	151
4.3.2.4	Siglo XIX.	152
4.3.2.5	Siglo XX	155
4.3.3	CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO	160
4.3.4	DENSIDAD POBLACIONAL	160
4.3.5	CONFORMACIÓN SOCIO-ECONÓMICA Y USOS DE LAS EDIFICACIONES	161
4.4	DESCRIPCIÓN URBANÍSTICA Y SECTORIZACIÓN	162
4.4.1	DESCRIPCIÓN URBANÍSTICA.	162
4.4.2	SECTORIZACIÓN	162
4.4.2.1	Zonas de frontera	163
4.4.2.2	Zonas internas	166
4.5	EVOLUCIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES	170
4.5.1	TRADICIÓN COLONIAL.	172
4.5.2	REPUBLICANO.	173

4.5.3	ECLÉCTICO.....	174
4.5.4	MODERNO POPULAR.....	175
4.6	FACTORES DE AMENAZA SÍSMICA LOCAL.....	177
4.6.1	SUELOS Y GEOMORFOLOGÍA.....	177
4.6.2	EFFECTOS LOCALES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	182
4.6.2.1	Efecto de sitio por geología.....	182
 <u>5. REVISIÓN DE LITERATURA SOBRE METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES</u>		<u>184</u>
5.1	GENERALIDADES.....	184
5.2	MÉTODOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES EXISTENTES.....	185
5.2.1	MÉTODOS ANALÍTICOS.....	186
5.2.2	MÉTODOS SUBJETIVOS.....	188
5.2.2.1	Métodos que predicen el daño.....	189
5.2.2.2	Métodos que evalúan la capacidad sísmica.....	192
5.2.3	PROBLEMAS ASOCIADOS CON LOS MÉTODOS SUBJETIVOS.....	223
 <u>6. METODOLOGÍA DESARROLLADA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES.....</u>		<u>225</u>
6.1	GENERALIDADES.....	225
6.2	DETERMINACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	226
6.3	PROPUESTA METODOLÓGICA.....	228
6.3.1	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	228
6.3.2	DESCRIPCIÓN DE LOS INDICADORES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA	232
	Alta.....	245
	FUENTE: AIS, 2001	245
	FUENTE (AIS, 2001)	249
6.3.3	VENTAJAS DE LA METODOLOGÍA.....	256
 <u>7. INVENTARIO DE LAS EDIFICACIONES.....</u>		<u>258</u>
7.1	GENERALIDADES.....	258
7.2	RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	262
7.3	ANÁLISIS DEL INVENTARIO.....	267

8. PROCEDIMIENTOS, TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN Y RESULTADOS	280
8.1 GENERALIDADES.....	280
8.2 DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA	281
8.2.1 PROCEDIMIENTO	281
8.2.2 ANÁLISIS Y RESULTADOS	281
8.3 DETERMINACIÓN DE LA CATEGORÍA DE DAÑO SÍSMICO	284
8.3.1 PROCEDIMIENTO.	284
8.3.1.1 Definición de los parametros para el cálculo del daño sísmico. 286	
8.3.1.2 Definición de las hipótesis de sismo.	286
8.3.1.3 Definición del espectro.....	288
8.3.1.4 Cálculo de la categoría de daño sísmico.	290
8.3.2 ANALISIS Y RESULTADOS	296
8.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y DAÑO SÍSMICO DE UNA EDIFICACIÓN	299
8.4.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	299
8.4.2 DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA.....	301
8.4.3 DETERMINACIÓN DE LA CATEGORÍA DE DAÑO SÍSMICO.....	303
8.5 DETERMINACIÓN ESCENARIOS DE VULNERABILIDAD Y DAÑO SÍSMICO.....	307
8.5.1 PROCEDIMIENTO	307
8.5.2 DETERMINACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA ..	309
8.5.2.1 Escenario de vulnerabilidad por época de construcción.	309
8.5.2.2 Escenario de vulnerabilidad por sistema estructural.....	311
8.5.2.3 Escenarios de vulnerabilidad por configuración geométrica. .	312
8.5.2.4 Escenarios de vulnerabilidad por peso de la edificación.....	314
8.5.2.5 Escenarios de vulnerabilidad por rigidez.....	316
8.5.2.6 Escenario de vulnerabilidad por elementos no estructurales.	320
8.5.2.7 Escenarios de vulnerabilidad por suelo y cimentación.....	321
8.5.2.8 Escenario de vulnerabilidad por estado de conservación.	324
8.5.2.9 Escenario de vulnerabilidad física-global o de conjunto.....	325
8.5.3 ESTIMACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE DAÑO SÍSMICO.....	326
8.5.3.1 Daño Sísmico en las edificaciones.....	326
8.5.3.2 Escenario de daño sísmico para una $A_a = 0.07 g$	328
8.5.3.3 Escenario de daño sísmico para una $A_a = 0.17 g$	329
8.5.3.4 Escenario de daño sísmico para una $A_a = 0.25 g$	330
8.5.3.5 CALCULO DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS.....	333

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	336
9.1 CONCLUSIONES.....	336
9.1.1 CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS.	336
9.1.2 ESTADO DE CONSERVACIÓN.	336
9.1.3 CAUSAS DE LA VULNERABILIDAD.	337
9.1.4 POSIBLES CAUSAS DE FALLA SÍSMICA.	337
9.1.5 ANTECEDENTES DE VULNERABILIDAD DE LA MUESTRA ANALIZADA.	337
9.1.6 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS.	338
9.1.7 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES.	339
9.1.8 VULNERABILIDAD FÍSICA-GOLBAL O DE CONJUNTO.....	339
9.1.9 INDICADORES QUE GENERAN UN MAYOR GRADO DE VULNERABILIDAD .	339
9.1.10 VULNERABILIDAD CON RESPECTO A LA RIGIDEZ GLOBAL DE LAS EDIFICACIONES.....	340
9.1.11 VULNERABILIDAD CON RESPECTO AL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	342
9.1.12 VULNERABILIDAD CON RESPECTO AL TIPO DE CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA.....	342
9.1.13 VULNERABILIDAD CON RESPECTO AL ESTADO DE CONSERVACIÓN....	343
9.1.14 VULNERABILIDAD CON RESPECTO A LOS ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES.....	343
9.1.15 VULNERABILIDAD CON RESPECTO AL PESO DE LAS EDIFICACIONES. .	344
9.1.16 VULNERABILIDAD CON RESPECTO A TIPO DE SUELO Y CIMENTACIÓN.	344
9.2 RECOMENDACIONES.....	347
9.2.1 AMPLIAR EL UNIVERSO DE ESTUDIO DE EDIFICACIONES EN EL BARRIO.	347
9.2.2 REFINAMIENTO DEL ESTUDIO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL BARRIO SAN ANTONIO.	347
9.2.3 CONSIDERAR EL EFECTO TOPOGRÁFICO.	348
9.2.4 CONSERVACIÓN INTEGRAL DEL CONJUNTO PATRIMONIAL.	348
9.2.5 EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LAS LÍNEAS VITALES.....	350
9.2.6 HERRAMIENTA PARA LA PLANIFICACIÓN.	350
9.2.7 ESTUDIOS EN OTROS SECTORES DE LA CIUDAD.	350
9.2.8 SOCIALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS.	351
9.2.9 REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD.	351
9.2.10 MANTENIMIENTO DE LAS EDIFICACIONES.....	352
10. BIBLIOGRAFÍA.....	353