



DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS DE
EXPOSICIÓN CON FINES DE RIESGO SÍSMICO A PARTIR DE INFORMACIÓN CENSAL.
CASO DE APLICACIÓN: SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA

JULIANA ARENAS GUZMÁN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magíster en Ingeniería

Asesor

Ana Beatriz Acevedo Jaramillo

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2025

Agradecimiento

En primer lugar, expreso mi gratitud a la Universidad EAFIT por brindarme la oportunidad de crecer en el ámbito profesional a lo largo de mi formación.

A mi asesora de tesis, Ana Beatriz Acevedo, le agradezco profundamente su guía, la paciencia con la que me orientó y sus valiosos consejos; su apoyo incondicional ha sido esencial en este proceso.

A la Fundación GEM, por su respaldo y orientación constante, muchas gracias.

A los profesores que han acompañado mi camino académico y profesional, gracias por sus enseñanzas y por el conocimiento compartido.

A mi familia, por el amor, el ejemplo de vida y el apoyo incondicional que siempre me han dado.

Finalmente, a mi esposo Julián, le dedico un agradecimiento muy especial por su compañía, su aliento y su amor, que me dieron la fortaleza para seguir adelante y no desfallecer en los momentos más difíciles.

CONTENIDO

	pág
0. INTRODUCCIÓN.....	10
1. OBJETIVOS.....	22
1.1. GENERAL.....	22
1.2. ESPECÍFICOS.....	22
2. MARCO TEÓRICO O MARCO CONCEPTUAL.....	23
2.1. MODELO DE AMENAZA SÍSMICA.....	28
2.2. MODELO DE EXPOSICIÓN.....	29
2.2.1. Métodos de recolección de información.....	30
2.3. MODELO DE VULNERABILIDAD.....	35
3. METODOLOGÍA.....	37
3.1. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	38
3.1.1. Censo de Población y Vivienda (DANE, 2018).....	39
3.1.2. Encuestas Etapa I (2017) y II (2019).....	45
3.2. TIPOLOGÍAS SEGÚN LA TAXONOMÍA GEM IDENTIFICADAS EN SANTIAGO DE CALI 46	
3.2.1. Procesamiento de la información Etapa I y II.....	59
3.3. PARÁMETROS DEL MODELO DE EXPOSICIÓN.....	61
3.3.1. Cantidad de edificaciones.....	61
3.3.2. Sistema estructural de resistencia a cargas laterales.....	64
3.3.3. Población.....	77
4. RESULTADOS.....	81
4.1. MODELO DE EXPOSICIÓN DE CALI OBTENIDO CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	81
4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	5
5. CONCLUSIONES.....	16
REFERENCIAS.....	21
ANEXOS.....	28

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Eventos sísmicos históricos en Colombia [5]	13
Tabla 2. Eventos sísmicos históricos representativos reportados y su percepción y daños en Santiago de Cali.	14
Tabla 3. Continuación de eventos sísmicos históricos representativos reportados y su percepción y daños en Santiago de Cali.....	15
Tabla 4. Continuación de eventos sísmicos históricos representativos reportados y su percepción y daños en Santiago de Cali.....	16
Tabla 5. Continuación de eventos sísmicos históricos representativos reportados y su percepción y daños en Santiago de Cali.....	17
Tabla 5. Información consultada para la elaboración del modelo de exposición.....	38
Tabla 6. Archivos dentro de 76_ValleDelCauca_CSV [33].	40
Tabla 7. Parámetros de vivienda evaluados por el CENSO [33].	41
Tabla 8. Parámetros de hogares evaluados por el CENSO [33].....	42
Tabla 9. Parámetros evaluados por el CENSO para el MGN [33].	42
Tabla 10. Materiales de los sistemas estructurales de las encuestas de los estudios de riesgo sísmico (Etapas I y II).	47
Tabla 11. Sistema estructural de resistencia lateral.	47
Tabla 12. Tipologías con su respectiva taxonomía GEM [80].	48
Tabla 13. Cantidad de encuestas de las etapas I y II según sistema estructural y estrato.	60
Tabla 14. Porcentajes de encuestas de la etapa I y II según sistema estructural y estrato.	60
Tabla 15. Cantidad de encuestas de las etapas I y II según sistema estructural y altura.	61
Tabla 16. Porcentajes de encuestas de la etapa I y II según sistema estructural y altura.	61
Tabla 17. Clasificaciones materiales de pared según Censo Población y vivienda 2018 [33].	66
Tabla 18. Cantidad de viviendas por edificación según la cantidad de pisos.	73
Tabla 19. Rangos de asociación de cantidad de viviendas con cantidad de pisos para las edificaciones ubicadas en Santiago de Cali.	75
Tabla 20. Esquema de clasificación detallado para edificaciones con material de pared 1 según el censo.	76
Tabla 21. Fila resultado del modelo de exposición.....	81
Tabla 22. Cantidad de edificaciones y de habitantes por tipología estructural	85
Tabla 23. Cantidad de edificaciones y de habitantes por tipología estructural y rango de altura.....	1
Tabla 24. Continuación de cantidad de edificaciones y de habitantes por tipología estructural y rango de altura.....	2
Tabla 25. Resumen de cantidad de población, viviendas y edificaciones de investigaciones previas.	6
Tabla 26. Resumen de cantidad de población censada en el censo de población y vivienda 2018, [83].	6

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Fig 1. Distribución de los sismos con magnitud mayor a 6 en el último año [2].	10
Fig 2. Configuración neotectónica de la región caribe y norte de los Andes[3].	11
Fig 3. Distribución de las fallas tectónicas en Colombia [3].	12
Fig 4. Catalogo Sísmico Integrado con un total de 34,681 eventos presentados entre los años 1610 y 2014 [4].	12
Fig 5. Zonas de Amenaza Sísmica en Colombia y localización de Santiago de Cali – círculo rojo [28].	18
Fig 6. Amenaza sísmica global mediante la distribución geográfica de la aceleración máxima del suelo con una probabilidad excedencia del 10 % 50 años [36].	24
Fig 7. Mapa de Exposición global de cantidad de edificaciones residenciales, comerciales e industriales [36].	24
Fig 8. Mapa de Exposición global de valor de las edificaciones residenciales, comerciales e industriales [36].	25
Fig 9. Mapa de pérdidas humanas anuales promedio debido al colapso estructural de edificios inducido por terremotos [36].	25
Fig 10. Mapa promedio anual de edificaciones con daño total [36].	26
Fig 11. Mapa de distribución geográfica de la pérdida económica anual promedio en dólares (USD) [36]	26
Fig 12. Función de fragilidad (izquierda) y de vulnerabilidad (derecha) para edificaciones de muros de mampostería no reforzada (no-dúctil) con altura de 1 piso (MUR_LWAL-DNO_H1) [73].	36
Fig 13. Metodología para la construcción del modelo de exposición basado en información censal.	37
Fig 14. Código característico de cada uno de los departamentos de Colombia (rojo Departamento del Valle del Cauca).	39
Fig 15. Ruta de archivos utilizados en la construcción del modelo de exposición.	40
Fig 16. Niveles geográficos del MGN [79].	44
Fig 17. Conformación del código MGN para manzanas [79].	44
Fig 18. Encuestas realizadas en las Etapas I y II del estudio de riesgo de Cali gestionado por DAPM. Izquierda: franja de estudio Etapa I: en azul se indican las edificaciones encuestadas; derecha: en morado y verde se visualizan las encuestas realizadas en la Etapa II.	45
Fig 19. Construcción de muros en adobe sin ductilidad presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.	49
Fig 20. Construcción de muros de tapia sin ductilidad presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2022.	49
Fig 21. Edificación de pórtico de concreto resistente a momentos. Resaltado en rojo las juntas de dilatación, © Google 2022.	50
Fig 22. Edificación de pórtico con ductilidad baja presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2022.	51

Fig 23. Edificación de pórtico con ductilidad alta presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.	51
Fig 24. Edificación de pórtico con muros de relleno de ductilidad baja presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2022.	52
Fig 25. Edificación de pórtico con muros de relleno de ductilidad alta presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.	52
Fig 26. Construcción con muros de hormigón reforzado y ductilidad media localizada en Santiago de Cali, © Google 2021.	53
Fig 27. Edificación con muros de hormigón reforzado y alta ductilidad situada en Santiago de Cali, © Google 2022.	53
Fig 28. Estructura de sistema dual con alta ductilidad ubicada en Santiago de Cali, © Google 2021.	54
Fig 29. Edificación de mampostería no reforzada sin ductilidad de la ciudad de Santiago Cali, © Google 2021.	55
Fig 30. Edificaciones de mampostería reforzada con ductilidad baja en Santiago de Cali, © Google 2022.	55
Fig 31. Edificaciones de mampostería reforzada con ductilidad alta en Santiago de Cali, © Google 2021.	56
Fig 32. Edificación de mampostería confinada con ductilidad baja presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.	57
Fig 33. Edificación de mampostería confinada con ductilidad media presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.	57
Fig 34. Estructuras en madera localizadas en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2022.	58
Fig 35. Estructura elaborada con materiales no convencionales ubicada en Santiago de Cali, © Google 2021.	58
Fig 36. Distribución de estratos socioeconómicos por barrios en Santiago de Cali; datos tomados de [83].	59
Fig 37. Niveles de resolución del censo 2018.	62
Fig 38. Imagen satelital de la manzana 7600110000000016030102	63
Fig 39. Distribución de la cantidad de edificaciones por barrio en la ciudad de Santiago de Cali.	64
Fig 40. Distribución de la cantidad de viviendas por barrio en la ciudad de Santiago de Cali.	65
Fig 41. Distribución promedio de la cantidad de viviendas por edificación en cada uno de los barrios de la ciudad de Santiago de Cali.	66
Fig 42. Distribución de los materiales de pared (“1: Bloque, ladrillo, piedra, madera pulida; 2: Concreto vaciado; 3: Material prefabricado; 5: Tapia pisada, bareque, adobe; 6: Madera burda, tabla, tablón” [33]) comunes por barrio en la ciudad de Santiago de Cali.	67
Fig 43. Distribución del material de pared (3: Material prefabricado) por barrio en la ciudad de Santiago de Cali.	68
Fig 44. Edificaciones comunes en el barrio Chiminango I, Santiago de Cali.	69
Fig 45. Edificaciones comunes en el barrio Chiminango II, Santiago de Cali.	69
Fig 46. Encuestas de la Etapa I y Etapa II por cantidad de pisos.	72

Fig 47. Distribución de la población por estrato socioeconómico en la ciudad de Cali, [33].	78
Fig 48. Número de habitantes promedio por edificio en cada barrio de la ciudad de Cali.	79
Fig 49. Distribución de la población por barrio en la ciudad de Cali [33].	80
Fig 50. Distribución del sistema estructural para la manzana 7600110000000001030404 en la ciudad de Santiago de Cali.	82
Fig 51. Distribución del sistema estructural para la manzana 7600110000000002030115 en la ciudad de Santiago de Cali.	83
Fig 52. Distribución del sistema estructural para la manzana 7600110000000005090107 en la ciudad de Cali.	84
Fig 53. Distribución de la cantidad de edificaciones de cada sistema estructural por barrio.	3
Fig 54. Porcentaje de edificaciones (izquierda) y cantidad de habitantes (derecha) para las tipologías estructurales de mampostería y la agrupación de tipologías de concreto incluidas en el modelo de exposición sísmica de viviendas urbanas de la ciudad de Santiago de Cali.	4
Fig 55. Densidad poblacional por km ²	4
Fig 56. Viviendas ocupadas con personas ausentes [83].	6
Fig 57. Comparación de distribución de tipologías estructurales en el presente estudio con modelos distribuciones de los modelos de TREQ (2021)[30] y Acevedo [48].	7
Fig 58. Comparación de distribución de tipologías estructurales de concreto de la presente investigación con modelos distribuciones de los modelos de TREQ (2021)[30] y Acevedo [48].	8
Fig 59. Comparación de distribución de tipologías estructurales con ductilidad y altura de la presente investigación con el modelo de Acevedo [48].	9
Fig 60. Comparación de distribución de tipologías estructurales con ductilidad y altura de la presente investigación con el modelo de TREQ (2021)[30].	13
Fig 61. Comparación de distribución de tipologías estructurales con ductilidad y altura de las tipologías de mampostería, adobe y madera de la presente investigación con el modelo de TREQ (2021)[30].	13
Fig 62. Comparación de distribución de tipologías estructurales con ductilidad y altura de las tipologías de concreto de la presente investigación con el modelo de TREQ (2021) [30].	14

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Distribución de tipologías estructurales según estrato y cantidad de pisos según las encuestas de la Etapa I y Etapa II. – Parte 1	28
Anexo B. Continuación de distribución de tipologías estructurales según estrato y cantidad de pisos según las encuestas de la Etapa I y Etapa II. – Parte 2	28
Anexo C. Continuación de distribución de tipologías estructurales según estrato y cantidad de pisos según las encuestas de la Etapa I y Etapa II. – Parte 3	29
Anexo D. Continuación de distribución de tipologías estructurales según estrato y cantidad de pisos según las encuestas de la Etapa I y Etapa II. – Parte 4	30
Anexo E. Distribución de tipologías estructurales según estrato, material de pared y cantidad de viviendas – Parte 1	32
Anexo F. Continuación de la distribución de tipologías estructurales según estrato, material de pared y cantidad de viviendas – Parte 2	33
Anexo G. Continuación de la distribución de tipologías estructurales según estrato, material de pared y cantidad de viviendas – Parte 3	34
Anexo H. Continuación de la distribución de tipologías estructurales según estrato, material de pared y cantidad de viviendas – Parte 4	35
Anexo I. Matriz de distribución de tipologías estructurales para los materiales de pared – Parte 1	36
Anexo J. Matriz de distribución de tipologías estructurales para los materiales de pared – Parte 2	37

Resumen

Este trabajo presenta una metodología para desarrollar modelos de exposición de edificaciones residenciales a partir de datos del censo de población y vivienda de Colombia (2018). Un modelo de exposición compila información de la infraestructura de un lugar y los parámetros que definen su comportamiento ante fuerzas externas; se utiliza junto con modelos de amenaza y vulnerabilidad en el análisis de riesgo catastrófico. La información censal resulta valiosa por ser pública, abarcar todo el país y permitir estimar datos relevantes como número de edificaciones, pisos, materiales y usos.

La metodología emplea el nivel de desagregación del censo en zonas urbanas (manzana) y variables de las encuestas de vivienda, como materiales de pared, estrato socioeconómico y número de habitantes. A partir de estas encuestas se estima el número de edificaciones residenciales. En Cali se identificaron 326,382 edificaciones con más de 1.7 millones de habitantes. Para asignar tipologías estructurales se emplearon tres variables: cantidad de viviendas por edificación, estrato socioeconómico y material de pared; esta última se correlaciona con la tipología, aunque puede asociarse a varias categorías. Para este estudio se contó con información de 24,499 encuestas de edificaciones realizadas por la Alcaldía de Cali.

El modelo desarrollado permitió construir un escenario de exposición a nivel de manzana que incluye número de edificaciones, tipología estructural y habitantes. Su validación frente a modelos existentes mostró diferencias entre 6–11%, valores aceptables y consistentes. La metodología es de fácil implementación y puede emplearse por entidades gubernamentales para elaborar modelos de exposición y apoyar la evaluación del riesgo sísmico en el territorio nacional.

Palabras clave: Modelos de exposición, riesgo sísmico, censo, tipología estructural

0. INTRODUCCIÓN

El riesgo sísmico se puede entender como la posibilidad de que ante la acción de un movimiento telúrico se puedan generar pérdidas humanas, materiales y ambientales. La probabilidad de que algunos asentamientos como pueblos, ciudades, departamentos entre otros, presenten un mayor riesgo sísmico está determinado por tres componentes: la amenaza sísmica, la exposición y la vulnerabilidad. El primer factor, correspondiente a la amenaza, hace referencia a la probabilidad de que ocurran sismos en una zona determinada. El segundo factor, correspondiente a la exposición, se refiere a los elementos susceptibles de afectarse por el evento sísmico y el tercer factor, la vulnerabilidad, se entiende como la susceptibilidad de los elementos a presentar daños frente a un sismo, lo cual está ligado de manera directa a sus condiciones físicas y a las características de su diseño estructural [1].

En el planeta tierra existe una zona donde ocurren la mayor cantidad de sismos, esa zona se denomina cinturón de fuego del Pacífico y es la franja que rodea el Océano Pacífico. En la Fig 1 se presenta la distribución de los sismos con magnitud mayor a 6 en el último año donde se puede observar que la mayoría ocurrieron en el cinturón de fuego del Pacífico.

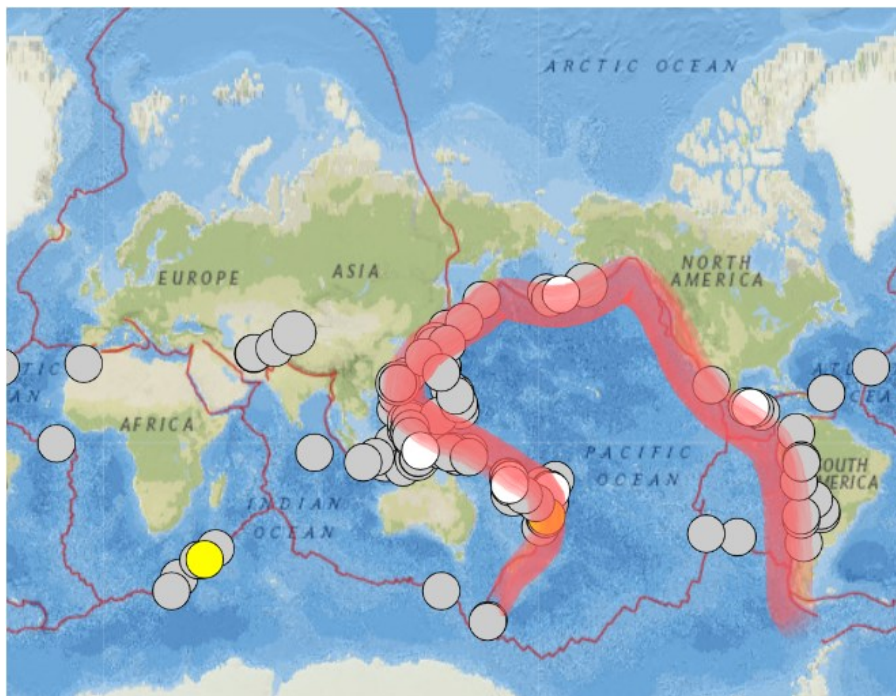


Fig 1. Distribución de los sismos con magnitud mayor a 6 en el último año [2].

Colombia se ve afectado considerablemente por la sismicidad producida en el cinturón de fuego de Pacífico, ya que el occidente del país limita con el Océano Pacífico. Adicionalmente se encuentra localizado en la interacción de 4 placas tectónicas: Nazca, Suramericana, Caribe y Microplaca de Panamá como se visualiza en la Fig 2. El contacto de estas placas genera acumulación y posterior liberación de energía lo que causa los movimientos sísmicos. Además, en la Fig 3 se puede visualizar que dentro del territorio colombiano se encuentra un amplio sistema de fallas geológicas activas, el cual representa otra fuente significativa de actividad sísmica y en la Fig 4 se observa la distribución de los sismos registrados en Colombia mediante el catálogo sísmico integrado desarrollado para el modelo de amenaza sísmica nacional por el Servicio Geológico Colombiano[3].



Fig 2. Configuración neotectónica de la región caribe y norte de los Andes[3].

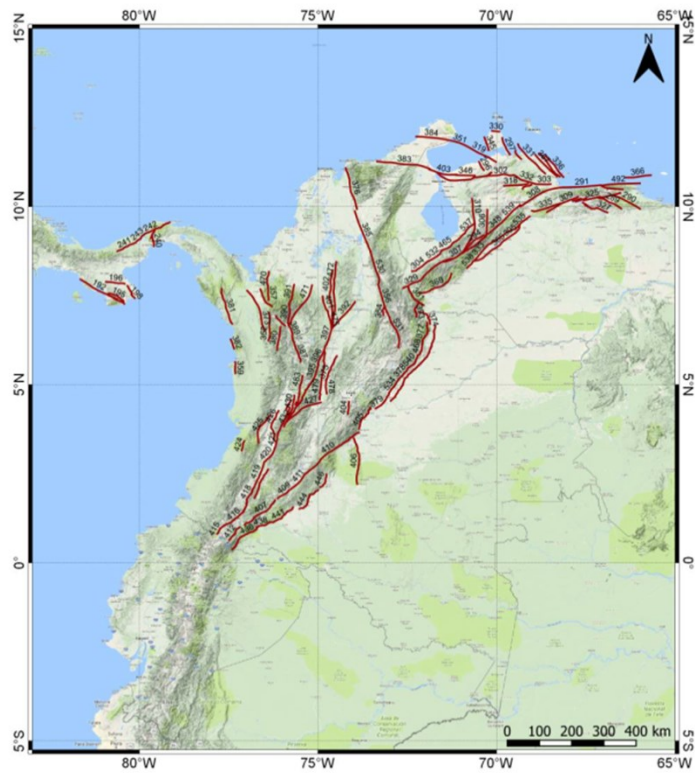


Fig 3. Distribución de las fallas tectónicas en Colombia [3].

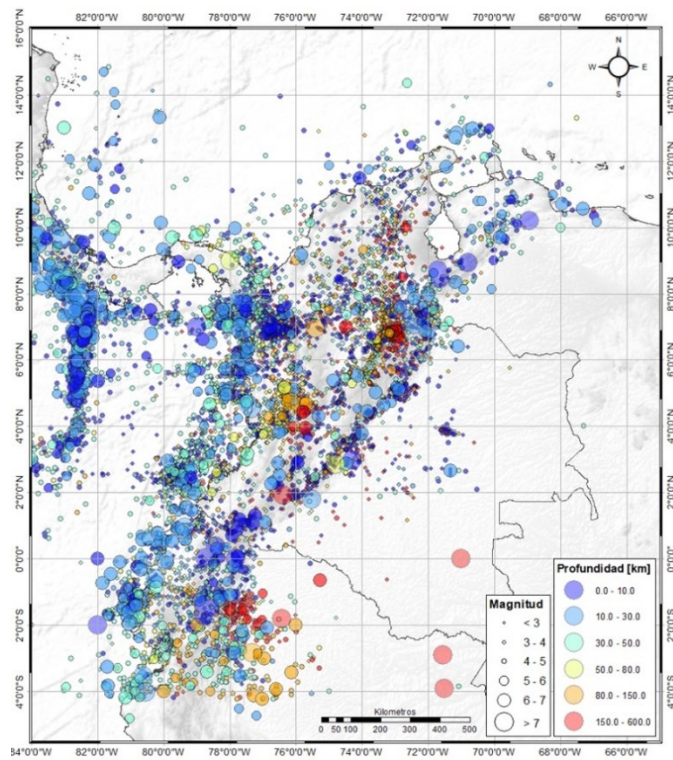


Fig 4. Catalogo Sísmico Integrado con un total de 34,681 eventos presentados entre los años 1610 y 2014 [4].

En la Tabla 1 se presentan sismos que por sus efectos en la población y en la infraestructura tales como afectaciones humanas y daños en las estructuras, son considerados como sismos históricos para el país, que han evidenciado el riesgo sísmico en Colombia.

Tabla 1. Eventos sísmicos históricos en Colombia [5]

Fecha	Sitio relacionado	Magnitud (Mw)
16/01/1644	Pamplona, Norte de Santander	6.5
16/11/1827	Altamira, Huila	7.1
18/05/1875	Cúcuta, Norte de Santander	6.8
31/01/1906	Costa Pacífica	8.8
31/08/1917	Villavicencio, Meta	6.7
04/02/1938	Eje Cafetero	7.0
14/07/1947	Pasto, Nariño	6.0
08/07/1950	Arboledas, Norte de Santander	6.1
30/07/1962	Eje Cafetero	6.5
09/02/1967	Colombia, Huila	7.0
29/07/1967	Betulia, Santander	6.8
11/07/1976	Darién, Panamá	7.3
23/11/1979	Eje Cafetero	7.2
12/12/1979	Costa Pacífica	8.1
31/03/1983	Popayán, Cauca	5.6
18/10/1992	Murindó, Antioquia	7.1
06/06/1994	Páez, Cauca	6.8
19/01/1995	Tauramena, Casanare	6.5
08/02/1995	Calima, Valle del Cauca	6.4
25/01/1999	Eje Cafetero	6.1
15/11/2004	Bajo Baudó, Chocó	7.2
08/06/2025	Paratebueno, Cundinamarca	6.4
14/09/2025	Uramita, Antioquia	5.3

Dentro de los sismos mencionados en la Tabla 1 se destaca el sismo del 31 de marzo de 1983 en Popayán el cual dejó un número de 250 muertos y 1,500 heridos, 4,964 construcciones destruidas y 13,796 viviendas con daños muy graves [6].

Uno de los eventos sísmicos más significativos en la historia reciente de Colombia tuvo lugar el 25 de enero de 1999 en la ciudad de Armenia, capital del departamento del Quindío, donde habitaban aproximadamente 300 mil personas. El movimiento telúrico provocó 921 fallecimientos, más de 2.300 personas lesionadas y daños en unas 30 mil viviendas, además de afectar cerca del 75 % de las instituciones educativas de la ciudad. Las consecuencias del sismo también se extendieron a otros municipios del Quindío como Córdoba, Pijao, Calarcá, La Tebaida, Montenegro, Quimbaya, Circasia, Salento, Buenavista y Filandia, así como a Pereira (Risaralda) y a Caicedonia, Alcalá y Ulloa (Valle del

Cauca). En total, se registraron afectaciones en 28 municipios, consolidándose como uno de los terremotos más devastadores del país [7]. Adicionalmente se cuenta con registros de un sismo de 8.8 magnitud momento en la costa pacífica colombiana ocurrido el 31 de enero de 1906, perteneciendo entonces a los sismos de mayor magnitud a nivel mundial. Este evento no generó tantas pérdidas como el sismo de Armenia debido a la escasa población y construcciones; varias de las pérdidas se le atribuyen al tsunami que ocurrió como efecto del sismo. Se tienen registros de que el evento sísmico generó daños en la capilla de la guarnición y en el arsenal de la ciudad de Santiago de Cali, ciudad que es el objeto de estudio en esta investigación [8].

Entendiendo ahora el potencial destructivo de los sismos que se han presentado en el territorio colombiano se presenta en la Tabla 2 la revisión de los principales eventos que han afectado a la ciudad de Santiago de Cali.

Tabla 2. Eventos sísmicos históricos representativos reportados y su percepción y daños en Santiago de Cali.

Fecha	Sitio relacionado	Magnitud (Mw)	Percepción y daños en la ciudad de Santiago de Cali
9/07/1766	Buga, Valle del Cauca	6.5	Varias casas de paja colapsaron, y tanto la mayoría de las viviendas como la Hermita, las capillas de San Francisco y de Jesús, y la iglesia de San Agustín sufrieron daños severos; además, se registraron alrededor de 120 réplicas hasta el 25 de julio [9]
5/11/1884	Herveo, Tolima	6.3	Se sintió muy fuerte y causó daños en algunas casas. La iglesia de San Pedro quedó muy averiada [10]

Tabla 3. Continuación de eventos sísmicos históricos representativos reportados y su percepción y daños en Santiago de Cali.

Fecha	Sitio relacionado	Magnitud (Mw)	Percepción y daños en la ciudad de Santiago de Cali
25/05/1885	El Tambo, Cauca	6.4	Se sintió fuerte; las iglesias de San Pedro, San Francisco y la Catedral, así como el colegio de Santa Librada, sufrieron daños importantes [9].
31/01/1906	Costa Pacífica, Pacífico	8.8	Causó alarma en la población; la iglesia, el cuartel y la torre de la iglesia de San Pedro resultaron averiados, y colapsaron tapias y fachadas antiguas [10].
7/06/1925	Cali, Valle del Cauca	6.1	La mayoría de sus habitantes salieron asustados a las calles; cayeron botellas y frascos en las cantinas y en las farmacias. Quedaron averiadas varias casas, las iglesias de San Pedro, San Francisco, San Nicolás, Santa Rosa, La Merced y Santa Librada, la casa municipal, el matadero y el manicomio. La Ermita quedó semidestruida, y colapsaron el Hotel Francia y algunas casas del barrio Cañaveralejo [11] y [12]
4/02/1938	Eje cafetero, Colombia	7.0	Gran parte de la población salió atemorizada a las calles. Cayeron artículos en farmacias y almacenes, y algunas construcciones presentaron daños leves; varios techos frágiles colapsaron [13] y [12].

Tabla 4. Continuación de eventos sísmicos históricos representativos reportados y su percepción y daños en Santiago de Cali.

Fecha	Sitio relacionado	Magnitud (Mw)	Percepción y daños en la ciudad de Santiago de Cali
23/05/1957	Buenaventura, Valle del Cauca	6.1	Se sintió fuerte y provocó pánico; muchas personas salieron a las calles. Cayeron pequeños objetos y, en las iglesias, se desprendieron las imágenes. Algunas viviendas sufrieron averías, mientras que en otros sectores los daños fueron leves o nulos. Se registraron tres réplicas hasta el 31 de mayo [9] y [10].
20/12/1961	Sonsón, Antioquia	6.8	Gran parte de la población salió atemorizada a las calles. Cayeron botellas, estantes, avisos luminosos y objetos pesados. Algunos edificios, como el Banco de Bogotá, el Hotel Nueva York, la Colombiana de Seguros, las iglesias de San Cayetano y del Perpetuo Socorro, y el hospital departamental, presentaron graves agrietamientos, mientras que en otros sectores solo se registraron daños menores [11] y [10].
9/02/1967	Colombia, Huila	7.0	Se sintió fuerte y generó pánico entre quienes se encontraban en edificios altos, que salieron a las calles. Varias ventanas se rompieron, y en los colegios Damián González y Pío XII, así como en la iglesia El Templete, se cayó un muro. El resto de las edificaciones presentó daños leves a moderados [12] y [10].

Tabla 5. Continuación de eventos sísmicos históricos representativos reportados y su percepción y daños en Santiago de Cali.

Fecha	Sitio relacionado	Magnitud (Mw)	Percepción y daños en la ciudad de Santiago de Cali
23/11/1979	Eje cafetero, Colombia	7.2	Las personas salieron a la calle. Resultaron averiados la Clínica Rafael Uribe Uribe, el hospital departamental, el Banco de Colombia, una sede de la Universidad Santiago de Cali, el Palacio Nacional y el edificio Mercafé. [9].
18/10/1992	Murindó, Antioquia	7.1	Algunas personas se despertaron. Se registraron daños leves en pocas viviendas [10].
6/06/1994	Páez, Cauca	6.8	Muchas personas salieron de sus casas. Cuatro edificios en el sur de la ciudad presentaron fuertes agrietamientos en los muros [11].
8/02/1995	Calima, Valle del Cauca	6.4	Se registraron 36 heridos. La mayoría de las personas se asustaron y salieron a la calle. Se afectó la mampostería y vitrales de 60 edificaciones [12] y [13].
15/11/2004	Pizarro, Chocó	7.2	La mayoría de los habitantes lo sintieron; muchos se despertaron y salieron de sus casas con pánico, aunque solo se reportaron pocos heridos. Cayeron muebles pesados, principalmente en pisos altos, y se observó oscilación de objetos colgantes. Unos 15 edificios y 22 casas sufrieron graves daños, sin colapsos; entre los más afectados estuvieron el Maraón, Colseguros y Farallones de Cali [14].
9/02/2013	Ospina, Nariño	7.3	Se afectaron 143 edificaciones con la aparición de grietas, entre ellas un centro de salud y tres centros educativos. Una edificación colapsó y se registraron ocho heridos [15].

Debido a los eventos sísmicos registrados en Colombia se ha visto la necesidad de la creación y actualización de normas sismorresistentes que reglamenten el diseño y la construcción para que esta se realice adecuadamente y así reducir el riesgo sísmico. Los primeros inicios de la ingeniería sísmica en el país se dieron con la fundación de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) en el año 1974. Esta asociación fue creada como una organización de carácter no lucrativo orientada a promover el avance del conocimiento y para el mejoramiento de técnicas relativas a la Ingeniería Sísmica, para resolver problemas nacionales [16]. La primera norma de sismo resistencia colombiana se denominó Norma AIS-100 que estaba basada en trabajos anteriores que había tenido la AIS con la adaptación de la traducción de la norma Americana ATC 3 [17]. Esta norma se expidió a través del Decreto 1400 de 1984, sustentado en la Ley 11 de 1983, que regulaba la reconstrucción de Popayán después del sismo del 31 de marzo de 1983; esta norma tuvo vigencia de 14 años. Posteriormente, con la promulgación de la Ley 400 de 1997, se estableció la norma sismo resistente NSR-98, y más adelante se generó una nueva actualización en 2010 con la creación de la norma vigente NSR-10 [17].

La ciudad de Santiago de Cali, capital del departamento del Valle del Cauca, constituye la tercera urbe más poblada del país, con aproximadamente 1.822.869 habitantes y es uno de los principales centros económicos y culturales del país. Presenta gran cercanía con el océano Pacífico y es catalogada como una zona de amenaza sísmica alta según el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10) como se visualiza en la Fig 5.

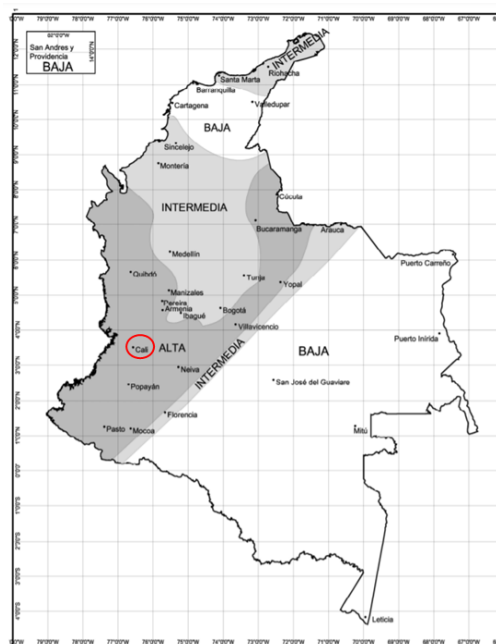


Fig 5. Zonas de Amenaza Sísmica en Colombia y localización de Santiago de Cali – círculo rojo [18].

La ciudad de Santiago de Cali es objeto de esta investigación debido a su ubicación geográfica, perteneciendo a una zona de amenaza sísmica alta. Adicionalmente, las pérdidas económicas y humanas que han generado sismos pasados como los presentados en la Tabla 2 indican una alta vulnerabilidad en la infraestructura. Debido a que Santiago de Cali es la tercera ciudad más poblada de Colombia y uno de los centros industriales más representativos del país, cuenta con gran cantidad de bienes expuestos lo que representa un alto nivel de exposición. Este nivel de exposición sumado a una amenaza sísmica alta y la vulnerabilidad de su infraestructura representa un elevado riesgo sísmico. El conocimiento de cada uno de los componentes del riesgo (amenaza, exposición y vulnerabilidad) es vital para poder realizar una estimación del riesgo sísmico de la ciudad; el presente trabajo se centra en el componente de exposición, buscando conocer el detalle de los bienes expuestos.

La ciudad de Santiago de Cali fue considerada como lugar de estudio por el Proyecto TREQ (Training and Communication for Earthquake Risk Assessment), un proyecto financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y ejecutado por la Fundación GEM [19] y que buscó determinar cómo la evaluación del riesgo sísmico puede informar a la comunidad y a los tomadores de decisiones para el desarrollo de políticas de reducción de riesgo.

Para las actividades del proyecto TREQ en Santiago de Cali la Fundación GEM contó con el apoyo del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Cali (DAPM), la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y la Universidad EAFIT, lo que permitió trabajar de la mano para generar un modelo de exposición con información catastral y censal para el proyecto TREQ y un segundo modelo a partir de información del Censo, objeto de esta investigación. Contar con el modelo más detallado desarrollado por el proyecto TREQ permitió realizar las respectivas comparaciones y verificar la validez de un modelo netamente censal [20].

Un modelo de exposición es un modelo georreferenciado de la infraestructura y de la población que contiene información como tipología del sistema estructural, material de construcción, edad de construcción, altura o cantidad de pisos (para el caso de edificaciones), personas que habitan/usan cada componente de la infraestructura, entre otros. Los modelos de exposición son insumos indispensables para evaluar el riesgo sísmico que presenta una determinada localidad, por lo cual es necesario contar con modelos de exposición bien detallados. Si bien para realizar la evaluación del riesgo sísmico se requieren modelos de amenaza, exposición y vulnerabilidad, las metodologías para el desarrollo de modelos de exposición presentan avances menores que aquellas para el desarrollo de los modelos de los otros dos componentes. Una de las razones para esta situación es que para desarrollar un modelo de exposición es necesario adaptarse a las condiciones locales, por lo que no existe una metodología “única” para su desarrollo; adicionalmente, la elaboración de modelos detallados de exposición depende de la

recolección de información por parte de diversas fuentes, entre ellas entidades gubernamentales, y en ocasiones la falta de información (o la falta de acceso a la información), diferencias entre bases de datos de diferentes organizaciones, etc., dificulta el desarrollo de estos modelos [21].

El principal componente de exposición física en las ciudades colombianas corresponde a las edificaciones residenciales. Para caracterizar adecuadamente estos bienes expuestos es necesario contar con buenas fuentes de información. En Colombia se cuenta con diferentes plataformas de datos que permiten un acercamiento para entender el contexto de las edificaciones residenciales y poder caracterizarlas. Entre algunas de las fuentes se destacan: la información catastral que presenta cada uno de los municipios, esta información se puede encontrar en el geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [22], y la información censal que se realiza a nivel nacional, donde se encuentra el último Censo de Población y vivienda del año 2018 [23], este censo representa una información valiosa para el desarrollo de modelos de exposición ya que a diferencia de censos anteriores se hacen públicas las encuestas. Estas encuestas están georreferenciadas a nivel de manzana censal para las zonas urbanas lo que permite identificar, mediante la manipulación de los datos, la cantidad de edificaciones y el material de pared de cada una de ellas, el cual es un insumo valioso para la identificación de sistema estructural. Adicionalmente, permite estimar el número de habitantes de cada edificación y el estrato socioeconómico de la edificación.

En la actualidad gracias a la gran cantidad de información de las construcciones (información catastral), información de las condiciones de vida y población (censos), información de imágenes satelitales, entre otros, se puede construir modelos de exposición más detallados. Sin embargo, poder implementar varias fuentes de datos para la realización de modelos de exposición para diferentes territorios implica una serie de dificultades. Entre las combinaciones más implementadas de diferentes fuentes de información se encuentran los modelos realizados con la información censal y catastral, los cuales representan modelos ricos en información, sin embargo, estos modelos presentan varios retos, tales como:

- Falta de estandarización en el almacenamiento de datos catastrales para cada uno de los territorios, debido a que para cada uno de estos se tienen diferentes convenciones para determinar las características de las edificaciones y la estructura de almacenamiento presenta diferentes formatos, lo cual dificulta replicar modelos desarrollados para otros territorios.
- El procesamiento de la información del censo para la obtención de la cantidad de edificaciones es diferente al procesamiento que debe hacerse de la información catastral: al trabajar con la información del censo de 2018 es necesario manipular la información de las encuestas para asociar aquellas que pertenecen a una misma edificación dentro de la menor unidad censal; por su parte, las bases de datos de catastro presentan polígonos de construcción, donde se divide una misma edificación por áreas de acuerdo con su uso y cantidad de pisos, por lo que se deben agrupar los

polígonos que pertenecen a una misma edificación de modo que se pueda estimar el número de edificios.

- Por la naturaleza de las bases de datos, es posible que al comparar las manzanas catastrales con las manzanas censales se encuentren diferencias en cantidad y/o coberturas, lo que genera trabajo adicional para correlacionar la información de ambas fuentes.

Debido a lo expresado anteriormente y la necesidad de poder contar con una mayor cobertura de modelos para el país, es valiosa la implementación de una metodología que pueda generar modelos de exposición para las diferentes ciudades de Colombia con los datos que se reúnen en el último censo de población y vivienda vigente, los cuales están disponibles para todo el territorio y pueden ser complementados con información proveniente de otras fuentes, tales como, información catastral, información satelital, etc.

El objetivo de este trabajo es generar una metodología fácil y precisa para la elaboración de modelos de exposición para municipios urbanos de Colombia, con el fin de presentar herramientas a las entidades gubernamentales para desarrollar modelos de exposición preliminares (o usar la metodología como un insumo complementario) que puedan usarse para la evaluación del riesgo sísmico, generando métricas que posibiliten la ejecución de medidas o acciones para mitigar y/o disminuir el riesgo sísmico.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se plantean en el capítulo 2 los objetos específicos con el fin de lograr desarrollar una metodología a partir de información censal para la realización de modelos de exposición sísmica para Colombia. En el capítulo 3 se exponen los conceptos claves de riesgo sísmico, amenaza, exposición, vulnerabilidad, al igual que metodologías para la elaboración de modelos de exposición. En el capítulo 4 se define la metodología para la elaboración de un modelo de exposición con la información censal, seguido de la implementación de la metodología propuesta para la ciudad de Santiago de Cali en el capítulo 5 y finalmente se presenta la validación del modelo en el capítulo 6

1. OBJETIVOS

1.1.GENERAL

Desarrollar una metodología a partir de información censal para la realización de modelos de exposición sísmica para Colombia.

1.2.ESPECÍFICOS

- Explorar la información del Censo de Población y Vivienda del DANE (2018) para evaluar su uso en el desarrollo de modelos de exposición con fines de evaluación del riesgo sísmico.
- Clasificar las edificaciones de uso residencial de la ciudad de Santiago de Cali según su sistema estructural, rango de altura, material de paredes y estrato socioeconómico.
- Evaluar la precisión y calidad de un modelo de exposición realizado con datos censales.

2. MARCO TEÓRICO O MARCO CONCEPTUAL

El riesgo sísmico corresponde a las posibles pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, causadas por un sismo. Un sismo es una de las manifestaciones propias de la dinámica de la tierra, y se constituye en la amenaza sísmica cuando encuentra condiciones de vulnerabilidad de las personas, los bienes, la infraestructura o los medios de subsistencia [24].

El riesgo sísmico ha sido evaluado en los últimos años tanto a nivel mundial como regional. A nivel mundial se destaca el modelo global de riesgo sísmico desarrollado mediante un esfuerzo colaborativo liderado por la Fundación GEM, que ha permitido crear un repositorio de modelos probabilísticos de amenaza sísmica, conjuntos de datos de exposición global –que comprende información estructural y de ocupación con respecto a la zona residencial, comercial e industrial–, y un conjunto integral de funciones de fragilidad y vulnerabilidad para las construcciones más comunes [25]. En la versión más reciente, el modelo de riesgo sísmico global 2023 de GEM, se han realizado varias mejoras significativas. Este modelo incorpora nuevos conjuntos de datos en los modelos de exposición nacional, un algoritmo actualizado para la desagregación espacial de los activos, y ajustes que reflejan la inflación reciente y el rápido crecimiento poblacional en diversas regiones. Además, se han añadido nuevas clases de vulnerabilidad para representar mejor las prácticas locales de construcción y se han evaluado por separado la vulnerabilidad de los edificios y sus contenidos [26].

La evaluación del riesgo sísmico global se resume en seis mapas globales. El primer mapa presentado en la Fig 6 muestra la amenaza sísmica global mediante la distribución geográfica de la aceleración máxima del suelo con una probabilidad del 10 % de ser excedida en 50 años, calculada para condiciones de roca de referencia (velocidad de onda de corte de 760-800 m/s). La exposición global se ve representada en el segundo mapa presentado en la Fig 7, el cual muestra la distribución geográfica de las edificaciones residenciales, comerciales e industriales y en el tercer mapa de la Fig 8 donde se visualiza el valor económico de las edificaciones. El cuarto mapa presentado en la Fig 9 evidencia una estimación de las pérdidas humanas anuales promedio debido al colapso estructural de edificios inducido por terremotos. En el quinto mapa presentado en la Fig 10 se muestra el promedio anual de edificaciones con completo daño a causa de sismos. Por último y como resumen del modelo de riesgo sísmico se observa en la Fig 11 el mapa principal del estudio, donde se puede visualizar la distribución geográfica de la

pérdida económica anual promedio en dólares (USD) debido a los daños producidos en elementos estructurales y no estructurales en las edificaciones residenciales, comerciales e industriales [26].

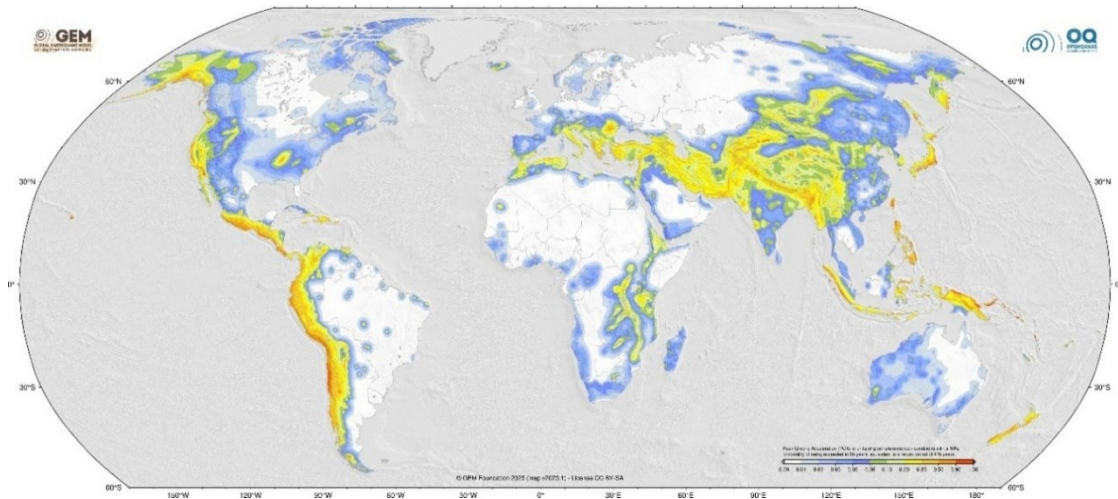


Fig 6. Amenaza sísmica global mediante la distribución geográfica de la aceleración máxima del suelo con una probabilidad excedencia del 10 % 50 años [26].

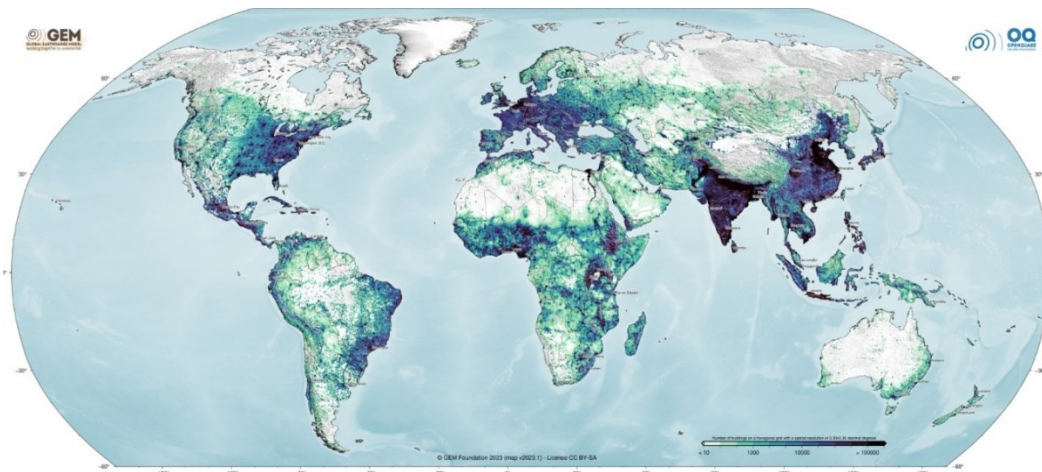


Fig 7. Mapa de Exposición global de cantidad de edificaciones residenciales, comerciales e industriales [26].

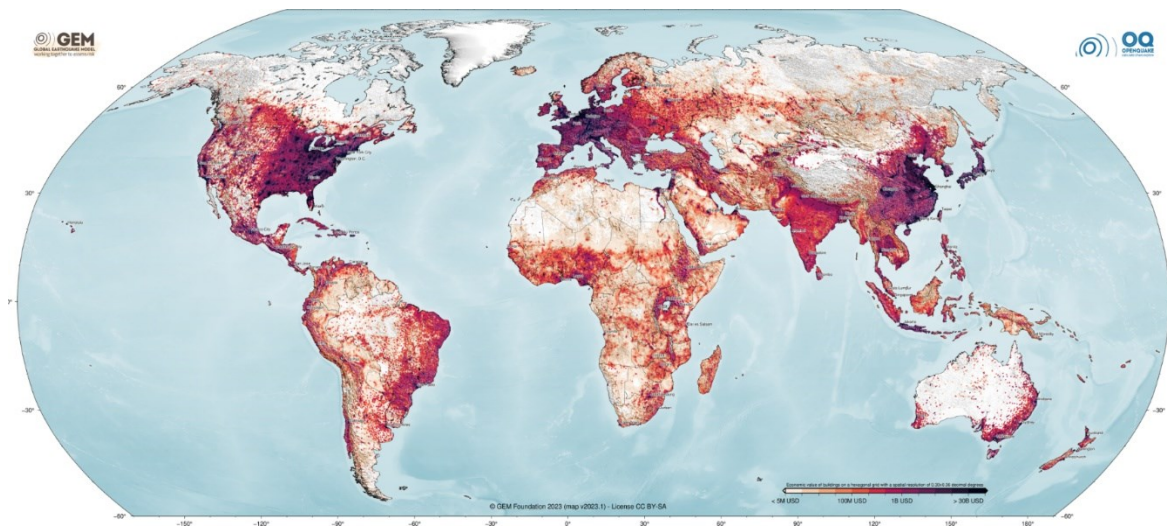


Fig 8. Mapa de Exposición global de valor de las edificaciones residenciales, comerciales e industriales [26].

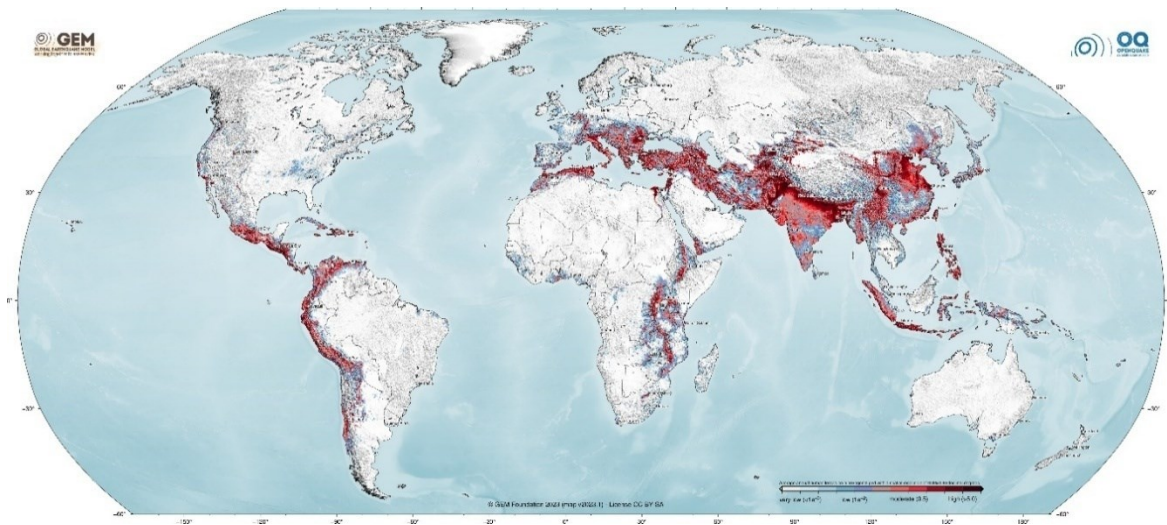


Fig 9. Mapa de pérdidas humanas anuales promedio debido al colapso estructural de edificios inducido por terremotos [26].

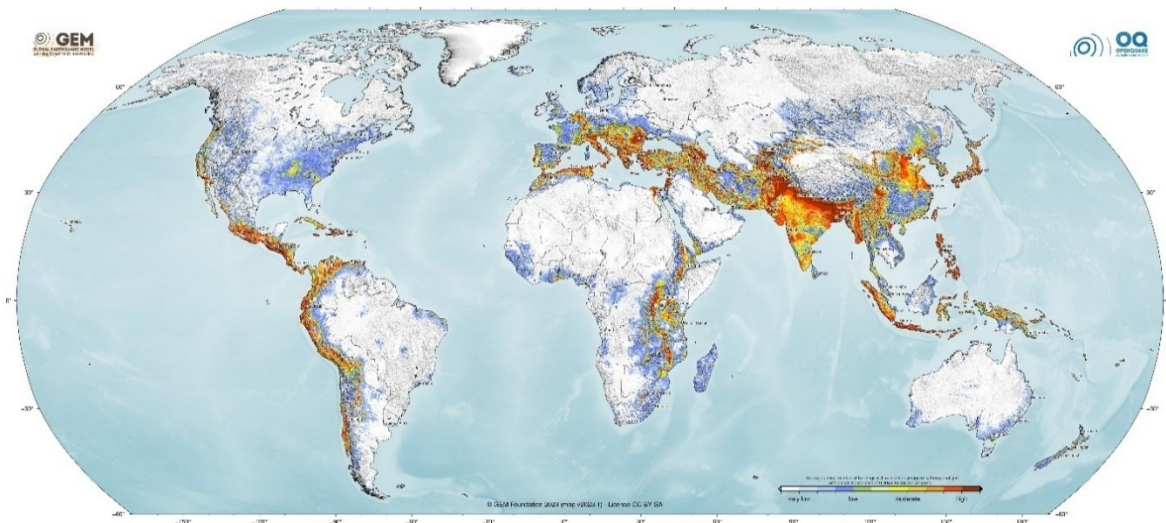


Fig 10. Mapa promedio anual de edificaciones con daño total [26].

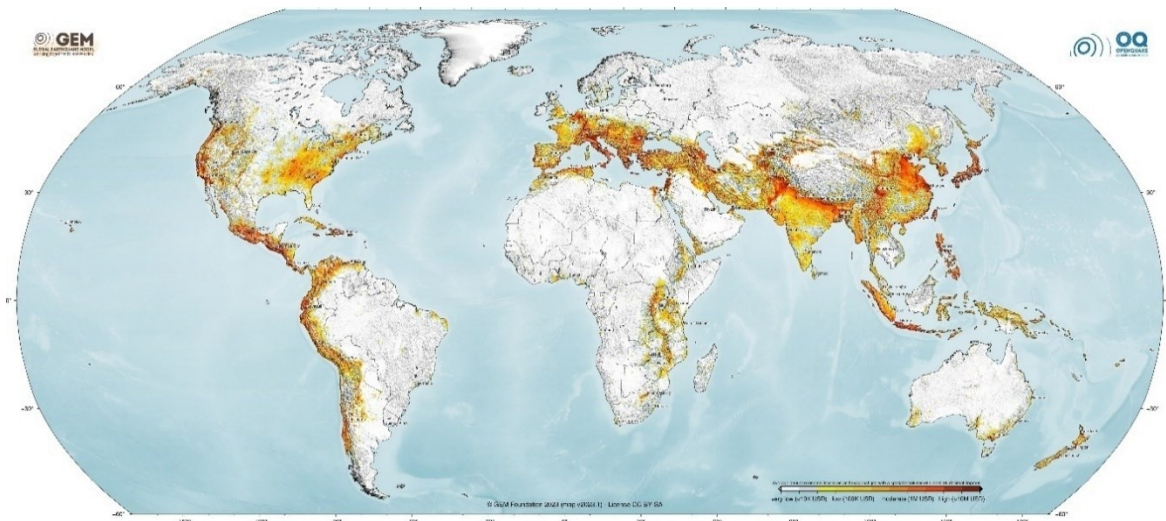


Fig 11. Mapa de distribución geográfica de la pérdida económica anual promedio en dólares (USD) [26]

Adicionalmente se han realizado evaluaciones de riesgo sísmico a nivel de América Latina, donde Colombia ha estado incluido. Entre estos estudios se destaca la iniciativa del Banco Interamericano de desarrollo (BID) para obtener un sistema de indicadores de riesgo de desastre incluido terremotos, donde estos permiten detallar las pérdidas económicas potenciales para un grupo 17 países de la región en caso de un desastre natural y evalúa la eficacia de sus gobiernos en la gestión de estos riesgos [27].

También se destaca una iniciativa apoyada por la Fundación GEM y la aseguradora Swiss Re durante los años 2013 y 2015, donde se evaluó el riesgo sísmico para siete países sudamericanos, incluido Colombia. Este proyecto recibió el nombre de South America Risk Assessment (SARA) [28]. En este proyecto se

desarrolló un modelo de evaluación probabilística de la amenaza sísmica (PSHA) aplicado a Sudamérica. De igual manera, el proyecto incluyó la elaboración de bases de datos de exposición y de curvas de vulnerabilidad utilizando un enfoque uniforme y modelos nacionales o conjuntos de datos regionales [29]. Los tres componentes: amenaza, exposición y vulnerabilidad, se usaron para estimar el riesgo sísmico en el continente.

Al interior de Colombia algunas de las ciudades como Bogotá, Medellín, Cali, Manizales y sus municipios cercanos han desarrollado estudios de microzonificación sísmica [30], [31], [32], [33]. Adicionalmente se han realizado escenarios de pérdidas y evaluaciones probabilísticas de riesgo sísmico para ciudades como Bogotá, Medellín y Manizales [30]; [34]; [35]. En los últimos años se ha continuado con la evaluación de escenarios de riesgo sísmico de las edificaciones residenciales en mampostería no reforzada para ciudades como Bogotá, Medellín y Cali [36]; [37]. Posteriormente se amplió esta información para las mismas ciudades, pero teniendo en cuenta todas las edificaciones residenciales [38].

A nivel nacional, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en colaboración con la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI) y trece universidades del país, desarrolló el Modelo Nacional de Riesgo Sísmico (MNRS), con el propósito de cuantificar y reducir el riesgo sísmico en Colombia mediante la integración de los componentes de amenaza, exposición y vulnerabilidad. Este modelo surge como respuesta a la alta exposición del territorio frente a eventos sísmicos, evidenciada por terremotos como el del Eje Cafetero de 1999 (Mw 6.1), que causó más de 1800 víctimas fatales, el colapso o daño severo de cerca de 36 mil edificaciones y pérdidas económicas equivalentes al 2.2 % del PIB nacional de ese año. El MNRS se desarrolló con el acompañamiento técnico del Global Earthquake Model (GEM) y de expertos internacionales como el profesor Eduardo Miranda, incorporando información geológica, estructural, demográfica y socioeconómica para la elaboración de modelos nacionales de exposición y vulnerabilidad. Sus resultados incluyen evaluaciones probabilísticas y determinísticas del riesgo sísmico para 90 centros urbanos, que representan alrededor del 60 % de la población del país, convirtiéndose en una herramienta científica esencial para la gestión del riesgo, la planificación territorial y la formulación de políticas públicas. Una descripción completa de su metodología y resultados se encuentra en la colección especial “National Seismic Risk Model of Colombia”, publicada en Earthquake Spectra (SAGE Journals) [39]

Finalmente, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia (UNGRD) publicó el Atlas de Riesgos para Colombia donde se plantean las diferentes amenazas a las que puede estar sometido el territorio colombiano como terremotos, tsunamis, volcanes, inundaciones, sequías, ciclones

tropicales, movimientos en masa, incendios de la cobertura vegetal y amenazas tectónicas. El estudio para la evaluación del riesgo probabilista tuvo en cuenta la información existente y utilizó los modelos de exposición propuestos dentro del alcance de país del Informe de Evaluación Global—GAR15 [40], los cuales contienen la información de la distribución de la población, información socioeconómica, tipos de edificación y datos del stock de capital [41].

Como se ha mencionado previamente, la evaluación del riesgo sísmico requiere el desarrollo de modelos de amenaza, exposición y vulnerabilidad. A continuación, se detallan las principales características de los modelos mencionados.

2.1.MODELO DE AMENAZA SÍSMICA

Entendiendo que los resultados de la evaluación del riesgo sísmico dependen directamente de la amenaza sísmica, esta se define como la representación de la severidad y la frecuencia de los sismos que pueden ocurrir en un determinado sitio [3]. En términos más específicos, la amenaza sísmica describe la probabilidad de exceder un nivel de movimiento del suelo (por ejemplo, aceleración o velocidad) en un periodo de tiempo dado, como resultado de la ocurrencia de uno o varios eventos sísmicos. Así, constituye la base para la estimación de escenarios y efectos esperados del movimiento fuerte del suelo.[42]. El presente trabajo toma en consideración la amenaza se considera solo respecto al movimiento fuerte del suelo, dejando por fuera fenómenos como licuación o deslizamientos en masa.

La amenaza sísmica puede expresarse a través de parámetros como la velocidad, la aceleración y el desplazamiento del terreno. En los modelos de amenaza sísmica probabilísticos es necesario cuantificar la amenaza para un periodo de tiempo determinado, logrando así indicar la probabilidad de excedencia de un nivel de movimiento fuerte del terreno durante un periodo de tiempo específico. Para crear adecuadamente modelos de amenaza sísmica se requiere identificar cómo se originan los sismos en el área de estudio, disponer de un registro histórico de eventos y aplicar ecuaciones que vinculen el movimiento fuerte previsto con los efectos de sitio (modificaciones del movimiento fuerte del terreno por la presencia de los diferentes tipos de suelos y su topografía).

Los catálogos de sismos históricos reúnen la información de los eventos sísmicos presentados con anterioridad en los lugares de estudio. Estos incluyen información sobre la fecha del evento, la ubicación espacial, la magnitud, características de rupturas y su origen.

También es necesario la compilación de las fallas activas de la zona de estudio y las fuentes sismogénicas, las cuales están definidas por la máxima magnitud observada en la fuente, el espesor de la fuente

sismogénica, la profundidad focal, la orientación y tipos de planos de ruptura y la frecuencia de la actividad sísmica.

Una vez identificados los orígenes de los movimientos fuertes del terreno se deben seleccionar las ecuaciones de predicción de movimiento, también llamadas ecuaciones de atenuación, las cuales relacionan la intensidad del movimiento fuerte con las características del sismo definidas a partir de la magnitud, distancia del sitio a la fuente, tipo de suelo, entre otras. Estas ecuaciones se seleccionan tras comparar los registros de acelerogramas con los resultados de las ecuaciones, encontrando así cuales se adaptan mejor a la región tectónica de estudio.

Por último, para calcular la amenaza en la superficie es necesario tener en cuenta los efectos de sitio que influyen en la variación de las intensidades sísmicas. Estos estudios también son conocidos como estudios de microzonificación sísmica. Al interior de Colombia algunas de las ciudades como Bogotá, Medellín, Cali, Manizales, Pasto y sus municipios cercanos han desarrollado estos estudios [30], [31], [32], [33], [43].

En la actualidad Colombia cuenta con dos modelos de amenaza sísmica: el modelo del Servicio Geológico Colombiano desarrollado en conjunto con la Fundación GEM [5] y el modelo de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, el cual es el modelo de referencia en el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NRS-10) [6].

2.2.MODELO DE EXPOSICIÓN

El siguiente factor que incide en la evaluación del riesgo sísmico es la exposición, es decir, las características de los elementos expuestos. Para el caso de la evaluación del riesgo sísmico en edificaciones el modelo de exposición se puede entender como un inventario georreferenciado de la infraestructura y de la población que puede contener algunos de los siguientes componentes y puede ser complementado por otras características según las necesidades de quien usará el modelo:

- **Tipología estructural:** se refiere a la clasificación de las edificaciones según su sistema de resistencia a cargas laterales, material del sistema, ductilidad y número de pisos.
- **Cantidad de edificaciones:** se refiere al número de construcciones independientes que agrupan uno o más espacios (viviendas, oficinas, etc.) con crecimiento principalmente vertical. Las edificaciones deben clasificarse según tipologías estructurales, es decir, según características

comunes que definen el comportamiento ante cargas sísmicas. La cantidad de edificaciones se presenta en el modelo de exposición de acuerdo con el nivel de georreferenciación en el que se entregan los resultados finales, como, por ejemplo, a nivel de manzana, barrio, comuna, ciudad, etc. (nivel de resolución del modelo).

- **Población:** se refiere al número de habitantes por edificación, de acuerdo con el nivel de resolución del modelo.
- **Número de pisos:** se refiere al número de pisos (o niveles) de cada edificación y es de vital importancia en la identificación de la tipología estructural ya que está relacionado con el periodo estructural (característica que define el comportamiento estructural ante cargas sísmicas).
- **Estrato socio económico:** de acuerdo con la definición del DANE, el estrato socio económico es una clasificación en estratos de los inmuebles residenciales que deben recibir servicios públicos [44]. Este parámetro está relacionado con la capacidad adquisitiva del propietario del inmueble, razón por la cual permite asociarse con la calidad constructiva de la edificación: se espera que al tener un mayor poder adquisitivo (estratos altos) las construcciones cuenten con mayor calidad en materiales y en la construcción; por el contrario, una edificación asociada a un menor poder adquisitivo (estratos bajos) tiene una mayor posibilidad de ser una construcción informal.
- **Valor de reposición:** se refiere al costo que tendría construir nuevamente la edificación después de que ocurre un evento sísmico. Este valor es diferente al valor comercial de la misma puesto que no incluye el costo del lote.
- **Valor comercial:** se refiere al precio que puede llegar a tener la propiedad en el mercado inmobiliario. Este tiene en cuenta factores como la ubicación, tipo de inmueble, características físicas, entre otros.

La actividad de recolección de información de edificaciones es primordial para llevar a cabo la evaluación del riesgo sísmico. Sin embargo, el desarrollo de los modelos de exposición no es una tarea sencilla y, contrario al desarrollo de modelos de amenaza sísmica, los cuales están ampliamente difundidos en los países expuestos a sismos, el desarrollo de los modelos de exposición es una actividad con un desarrollo más lento [21].

2.2.1. Métodos de recolección de información

A continuación, se presentan algunos de los métodos de recolección de información de edificaciones más utilizados, donde cada uno de estos métodos permite recolectar la información de diferentes

características de las edificaciones con diferentes niveles de precisión e inversión en tiempo y costo. Adicionalmente, se presenta una serie de métodos que se han desarrollado aprovechando los avances tecnológicos que permiten capturar grandes volúmenes de información a una escala global y mejor precisión.

- **Información previamente recolectada:**

La forma más directa de recolección de información es poder acceder a la información disponible en diferentes fuentes de datos o estudios llevados a cabo previamente, como por ejemplo la base de datos construida como resultado del proyecto de investigación denominado proyecto PAGER, el cual consolidó una base de datos global de edificaciones de diversas fuentes de información y utilizó un procedimiento propio para subsanar la falta de datos [45]. El Informe de Evaluación Global de la ONU de 2013, denominado GAR-13, tuvo por objetivo el desarrollo de un modelo de exposición global para evaluar el riesgo económico de los peligros naturales a escala global [46]. Este proyecto empleó una combinación de datos de censos, la Enciclopedia Mundial de la Vivienda (WHE por sus siglas en inglés), la base de datos obtenida en el proyecto PAGER, informes de las Naciones Unidas y HAZUS (Hazard-US). El proyecto GEM desarrolló GED4GEM (base de datos de exposición global para el modelo global de terremotos) mediante la incorporación de fuentes existentes de información física, socioeconómica, demográfica, geológica y geográfica en escalas diferentes, desde edificios globales hasta edificios individuales.

La Enciclopedia Mundial de la Vivienda (WHE) contiene información de las características de edificaciones residenciales a nivel mundial obtenida a través de informes elaborados por consultores expertos [47]. Posteriormente se realizó el proyecto WHE- PAGER, el cual consistió en la unión del Proyecto de Evaluación Rápida de la Respuesta a un Terremoto Global (PAGER) del Servicio Geológico de EE. UU. y la enciclopedia (WHE) del Earthquake Engineering Research Institute, creando así una base de datos global de las edificaciones y su vulnerabilidad. Este proyecto amplió el (WHE) abordando también las construcciones no residenciales, identificando la prevalencia de cada tipo de edificación en las diferentes zonas, abordando patrones de ocupación de las edificaciones y agregando estimaciones cuantitativas de vulnerabilidad [45]. Estas bases de datos han representado un avance importante, sin embargo, esta información es escasa para algunas ubicaciones geográficas y no cuenta con todos los tipos de edificaciones característicos de cada territorio. Adicionalmente, en ocasiones la información se

presenta en niveles de resolución que provoca pérdida de detalles importantes cuando se desea realizar una evaluación a nivel urbano [48].

Otra información valiosa que ha sido previamente recolectada es la información catastral, la cual es consignada por cada uno de los respectivos territorios. Un ejemplo de un modelo de exposición basado en la información catastral se encuentra en el modelo de riesgo sísmico para la ciudad de Bogotá del Centro de estudios Sobre Desastres y Riesgos– CEDERI (2005), en donde la exposición se determinó de acuerdo con la información catastral sin contar con recursos adicionales como encuestas. Esta exposición incluía no solo edificaciones residenciales, sino que incluía usos comerciales, industriales, institucionales, oficinas, salud. Para la determinación de la cantidad de personas se realizó una distribución teniendo en cuenta porcentajes de uso durante el día y la noche y el promedio de población por m²; para la determinación de la altura se realizó un algoritmo que tenía en cuenta las direcciones, cociente entre área construida y área del terreno y uso económico; el sistema estructural se asignó de acuerdo con el número de pisos, tipo de edificación, fecha de construcción, material y estrato socioeconómico.

- **Información censal:**

Las encuestas censales de viviendas y población son otra fuente de información que puede proporcionar datos sobre el tipo de edificaciones y características constructivas, así como estadísticas socioeconómicas. Los censos de población y vivienda se completan cada década en muchos países y, a menudo, incluyen información sobre el material de las paredes y los techos, lo que da una idea de los tipos y proporciones de los edificios en las escalas espaciales para las que hay datos disponibles.

En Colombia se han realizado esfuerzos importantes para el conocimiento de la población y de la vivienda desde la época de la colonia española. En 1824 se consagraron las normas que obligan a reportar información a hacienda pública y un año más tarde se creó la oficina central de estadísticas, la cual estableció una metodología para la realización del censo de ese año y que posteriormente se continuaría utilizando en los censos de 1835, 1843 y 1851[49]. En 1864 se realizó el censo que se había planteado desde un inicio en 1859 y que se postergó debido a las guerras civiles de la época. Este censo incorporó variaciones en los métodos y procedimientos. En 1875 se creó la primera Oficina Especial de Estadística Nacional con funcionarios dedicados, la cual posteriormente sería cerrada por falta de presupuesto y reabierta en el año 1888. En el año 1915 se comenzó con la publicación de anuarios estadísticos, los cuales incluían información sobre demografía, economía, comercio, transporte, actividades pecuarias, propiedad raíz, producción, entre otros. En 1935 se estableció la obligación de poner a disposición de

toda la ciudadanía la información estadística producida y el principio de reserva estadística para la información individual [49]. En 1953 se dio la creación del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y en 1964 se realizó el censo de población y vivienda, encontrando para Colombia 17,484,510 habitantes. En 1973 se realizó otro censo de población y vivienda evidenciando 20,666,920 habitantes. Entre 1976 y 1984 se fueron realizando avances en las encuestas que alimentarían posteriormente los censos de población y vivienda, como las encuestas de ingresos y gastos y encuestas de hogares. En 1993 se realizó un nuevo censo que incluía la encuesta de calidad de vida. En el año 2005 se realizó un censo general de población y en el 2018 se realizó un censo de población y vivienda que permite conocer un poco más a profundidad los datos al tenerlos georreferenciados por manzana para zonas urbanas, lo cual lo diferencia de los anteriores censos realizados [50].

Se resalta que a nivel internacional se han desarrollado procedimientos para llevar a cabo los censos [51], [52]; sin embargo, durante su ejecución es posible que no se respeten o se cumplan con estos procedimientos. Uno de los desafíos de estas metodologías está en la identificación del tipo de estructura cuando existe material de revestimiento, el cual puede confundirse con el material de los muros. Además, los datos del censo de edificaciones a menudo se agregan a nivel de localidades o vecindario, por lo que se requiere la agregación o desagregación de datos si la escala de los datos no coincide con la de la región de estudio. Un claro ejemplo de un modelo de exposición basado en la información censal se puede encontrar en la investigación de [53].

Otro ejemplo donde se implementó la información censal para el desarrollo de modelos de exposición fue en el proyecto SARA (evaluación del riesgo para Suramérica - Fundación GEM) en el cual la información censal se complementó con diversas fuentes de información para la creación de modelos de exposición de edificaciones y población [54].

- **Registros históricos:**

Los registros históricos son la documentación de hechos ocurridos en el pasado de forma escrita. Estos registros también constituyen una buena fuente de información acerca del inventario de las edificaciones, especialmente sobre las edades de construcción y tipologías estructurales predominantes en cada una de las épocas y la evolución de las normativas sismo-resistentes. Sin embargo, estas fuentes de información no están exentas de sesgos, errores, falta de detalles e información incompleta. Adicionalmente, también es posible adquirir información a través de entrevistas o talleres de expertos locales, este tipo de talleres entrega un amplio nivel de información, sin embargo, también está limitado por las opiniones, sesgos y la experiencia de los consultores [55].

- **Información satelital:**

El análisis de imágenes satelitales es cada vez más frecuente a medida que aumenta la disponibilidad y la capacidad de los satélites. Estas se pueden usar antes de un terremoto para extraer datos de edificios que ayuden a evaluar la vulnerabilidad de grandes áreas urbanas, como después del evento para evaluar los daños. Las técnicas de análisis GIS (sistema de información geográfica) se pueden utilizar para identificar el uso de la cubierta terrestre, huellas de edificios y posición en manzana para uso en evaluaciones de vulnerabilidad sísmica. Los elementos de los procesos de recopilación y análisis de datos satelitales se pueden automatizar, lo que reduce tanto el tiempo como el costo [56].

- **Estudios visuales rápidos o encuestas rápidas:**

Los estudios visuales rápidos (RVS) ofrecen una forma excelente y flexible de recopilar datos de edificaciones; se refieren a recopilar información de la edificación a partir de un registro de la fachada y los alrededores del edificio. Sin embargo, el proceso de estudio requiere muchos recursos, por lo que se debe limitar a un número reducido de edificaciones. Los métodos RVS, o encuestas de calles peatonales, son bastante frecuentes en la literatura y se utilizan como una forma de recopilar información sobre los edificios en un área. A menudo es necesario plantear muestreos estadísticos con el fin de reducir la intensidad del trabajo en campo y la recolección de información, permitiendo de esta forma poder extrapolar los resultados a un área de estudio más amplia [57]. El método RVS más destacado es el FEMA 154, que se publicó por primera vez en 1988 y se actualizó en 2002.

La técnica descrita en el FEMA 154 ha sido empleada a nivel mundial para la obtención de información empleando el formulario que esta contiene [58]. Los métodos RVS pueden ser particularmente intensivos en recursos si se requiere un alto nivel de detalle, sin embargo, pueden usarse para obtener una apreciación precisa y relativamente rápida del inventario de edificaciones en un área de estudio. Por lo general, es mucho más rápido que los estudios estructurales y brinda mejor información que las imágenes satelitales o los conjuntos de datos existentes.

En Colombia se han realizado varias investigaciones para obtener modelos de exposición usualmente basadas en la combinación de obtención de información de bases de datos como las catastrales y la información obtenida del censo y encuestas visuales rápidas realizadas desde el exterior de las edificaciones. Entre algunas de las investigaciones destacadas se encuentra el inventario de edificaciones de la ciudad de Medellín [59]. Igualmente se han realizado modelos de exposición con la implementación de imágenes satelitales para el departamento de Antioquia con una resolución de polígonos construidos [60]. También en la investigación [35] se planteó el modelo de exposición para la ciudad de Medellín

mediante el uso de la información catastral y censal del año 2005. Con la información catastral obtenida de la Alcaldía de Medellín se logró obtener la distribución de número de pisos y de nivel socioeconómico y con la información de encuestas censales se obtuvo características del material de piso y paredes de las viviendas del municipio[59].

En la ciudad de Santiago de Cali la alcaldía ha estado muy interesada en la determinación del riesgo sísmico de su ciudad, por lo cual ha participado en el desarrollo un proyecto para la estimación del riesgo sísmico ejecutado mediante dos etapas. La Etapa I se caracterizó por el estudio de una franja de la ciudad en sentido oeste a este, sobre el eje de la carrera primera, con una extensión de 290 Ha. Este estudio permitió la implementación de 4,921 encuestas de las edificaciones, lo cual generó un nivel de resolución de un modelo de exposición detallado; en las encuestas realizadas se recopiló información como estrato de la edificación, cantidad de pisos, año de construcción, material, uso de la estructura, sistema estructural [61]. La Etapa II comprendió la exposición de toda la ciudad, para la cual se realizaron 24,543 encuestas y se complementó la información con la información catastral [62]. La información más detallada de las encuestas realizadas por la alcaldía de Santiago de Cali se encuentra en el capítulo 4.1.2 del presente informe.

2.3. MODELO DE VULNERABILIDAD

Otro factor determinante en la evaluación del riesgo sísmico es la vulnerabilidad, la cual caracteriza el comportamiento de las edificaciones ante la posible ocurrencia de terremotos, de acuerdo con las propiedades físicas de cada estructura. Las propiedades de interés en un modelo de vulnerabilidad son: sistema estructural, cantidad de pisos, ductilidad, etc.

En las últimas décadas se han desarrollado múltiples metodologías empíricas y analíticas para llevar a cabo la evaluación del riesgo sísmico y la vulnerabilidad, con el fin de cuantificar el nivel de daños a estructuras o elementos del sistema estructural. Para la evaluación del riesgo sísmico es necesario agrupar los elementos expuestos en tipologías estructurales, es decir, grupos definidos de acuerdo con las características que definen el comportamiento sísmico. Cada tipología estructural debe tener asociada una curva de vulnerabilidad (relación de pérdidas con el nivel de amenaza) y las correspondientes curvas de fragilidad (relación de daños con la amenaza).

Las primeras curvas de vulnerabilidad se derivaron utilizando los datos de daños por observación de eventos anteriores, pero recientemente los análisis computacionales han permitido el desarrollo de curvas de vulnerabilidad y fragilidad de manera analítica. Las curvas de fragilidad describen la probabilidad de

alcanzar o exceder un estado límite de daño, dada una respuesta estructural, ante una acción sísmica determinada. Estas funciones se pueden convertir en funciones de vulnerabilidad utilizando un modelo de daño a pérdida (es decir, la relación entre un estado de daño y la fracción correspondiente de pérdida), lo que genera una distribución de probabilidad de tasa de pérdida condicionada a un conjunto de intensidades de sacudidas del suelo [63].

A lo largo de los años en el mundo se han desarrollado diferentes modelos de curvas de fragilidad y vulnerabilidad debido a las investigaciones independientes y esfuerzos de cooperación por las diferentes fundaciones y entidades gubernamentales. Por ejemplo, el conocido paquete de software HAZUS realizado por la Agencia Federal de Manejo y Emergencias de los Estados Unidos (FEMA) incluye más de 100 modelos de fragilidad para las diferentes clases de edificios en Estados Unidos [64]. En el continente europeo se han realizado algunos proyectos de funciones de fragilidad y vulnerabilidad financiados por la Comisión Europea como el proyecto RISK-UE [65] y el proyecto SERA [66]. En el continente americano también se han realizado algunos esfuerzos como la proposición de funciones de fragilidad para 54 clases de edificaciones [67]. A continuación, se presenta en la Fig 12; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** un ejemplo de la función de fragilidad y vulnerabilidad para una estructura de muros de mampostería no reforzada (MUR_LWAL) sin ductilidad (DNO) con una altura de 1 piso (H1).

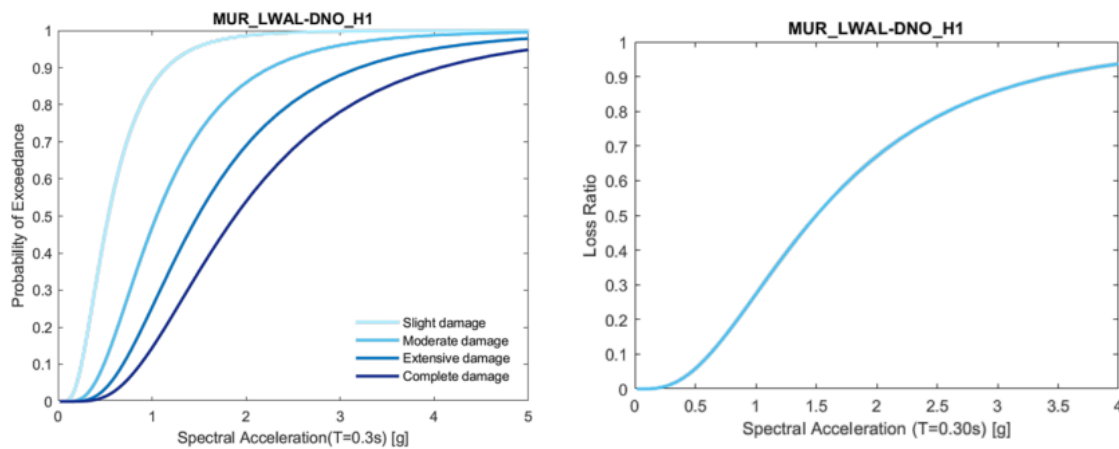


Fig 12. Función de fragilidad (izquierda) y de vulnerabilidad (derecha) para edificaciones de muros de mampostería no reforzada (no-dúctil) con altura de 1 piso (MUR_LWAL-DNO_H1) [63].

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología aplicada para elaborar el modelo de exposición de edificaciones residenciales en Santiago de Cali a partir de la información censal. El proceso metodológico comprende diferentes etapas, entre ellas la recopilación de datos (sección 3.1), la caracterización de las tipologías estructurales de la ciudad (sección 3.2) y la definición de los parámetros del modelo (sección 3.3). Asimismo, en la Fig 13 se ilustra de manera general el esquema de actividades que componen esta metodología, las cuales se detallan posteriormente en cada uno de los parámetros



Fig 13. Metodología para la construcción del modelo de exposición basado en información censal,

Fuente: propia.

A continuación, se presenta la sección 3.1 donde se detallan las fuentes de información necesarias para la realización del modelo de exposición bajo la metodología propuesta y el proceso de obtención de la información relevante de cada una de las fuentes. Le sigue la sección 3.2 donde se describen las tipologías

estructurales encontradas en la ciudad a partir de las diferentes fuentes de información y en la sección 3.3 se detalla la metodología de obtención de los parámetros del modelo como cantidad de edificaciones, tipología estructural y población, los cuales solo pueden obtenerse una vez se procesan las diferentes fuentes de información.

3.1.FUENTES DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo de este trabajo se contó principalmente con la información del Censo de Población y Vivienda 2018 [23]. Esta información permitió extraer datos como el material de paredes de cada edificación, el estrato socioeconómico, la cantidad de viviendas y población por cada edificación. También se contó con la información suministrada por la Alcaldía de Santiago de Cali, la cual incluye encuestas desarrolladas en estudios de riesgo sísmico anteriores (Etapa I y Etapa II) [62]. Estas encuestas permitieron la realización de esquemas de clasificación, es decir, la definición de criterios de asignación de tipologías estructurales a partir de características obtenidas de la información del censo, para así poder extrapolar y obtener la información de la tipología estructural para cada edificación residencial de la ciudad de Santiago de Cali. A continuación, en la Tabla 6 se presenta la información consultada en la presente investigación y sus fuentes.

Tabla 6. Información consultada para la elaboración del modelo de exposición.

Archivo	Formato	Contenido	Fuente
Capa de límite catastral	Shape.shp	Contiene el perímetro urbano	IDESC Alcaldía de Santiago de Cali
Usos del suelo	Shape.shp	Contiene la información del uso del suelo en la ciudad	IDESC Alcaldía de Santiago de Cali
Encuestas Etapa I	Shape.shp	Encuestas realizadas a las viviendas	Alcaldía de Santiago de Cali
Encuestas Etapa II	Shape.shp	Encuestas realizadas a las viviendas	Alcaldía de Santiago de Cali
CNPV2018_1VIV_A2_76 (Código 76 hace referencia al departamento del Valle del Cauca)	cvcs	Censo de población y vivienda - encuesta de viviendas	DANE
CNPV2018_2HOG_A2_76 (Código 76 hace referencia al departamento del Valle del Cauca)	cvcs	Censo de población y vivienda - encuesta de hogares	DANE
CNPV2018_MGN_A2_76 (Código 76 hace referencia al departamento del Valle del Cauca)	cvcs	Censo de población y vivienda - encuesta de sistema de referencia	DANE

3.1.1. Censo de Población y Vivienda (DANE, 2018)

El Censo de Población y Vivienda 2018 [23] representa la fuente estadística más reciente sobre la caracterización demográfica y habitacional de Colombia. Este proceso permitió recopilar información detallada acerca de las personas que habitan el país, las viviendas que ocupan y la composición de los hogares. Los resultados del censo constituyen una base fundamental para conocer el número de habitantes, su distribución territorial y las condiciones en que viven.

Los archivos de la información censal se encuentran divididos por departamento y se pueden obtener a través del siguiente enlace: https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/643/get_microdata.

Cada uno de los departamentos presenta un código característico el cual se evidencia desde la descarga de los datos. Esta investigación se enfocó en la ciudad de Santiago de Cali, la cual se encuentra ubicada en el departamento del Valle del Cauca. En la Fig 14 se puede observar que el código asignado a este departamento es el 76.

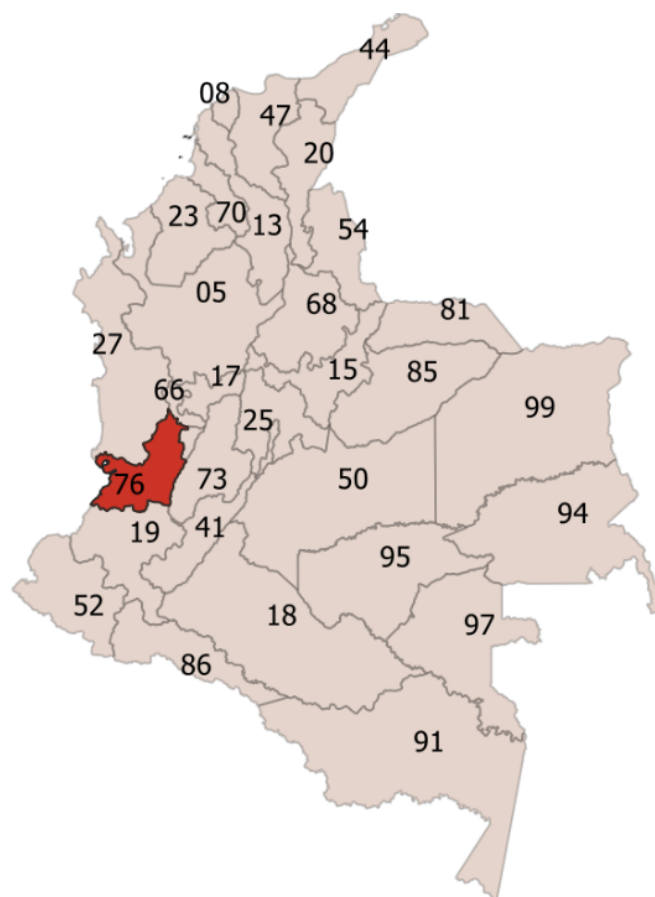


Fig 14. Código característico de cada uno de los departamentos de Colombia (rojo Departamento del Valle del Cauca), Fuente: propia.

La carpeta **76ValleDelCauca** es la carpeta descargada desde la página de archivo nacional de datos para el Censo de Población y Vivienda 2018 para el departamento del Valle del Cauca, la cual contiene toda la información de las encuestas realizadas para todos los municipios de este departamento. Dentro de la carpeta se puede encontrar 3 archivos **76_ValleDelCauca_CSV**, **76_ValleDelCauca_DTA**, **76_ValleDelCauca_SAV**. En estas 3 carpetas se encuentra la información de las encuestas de cada municipio por tipo de encuesta en diferentes extensiones. Por lo cual, la carpeta a implementar es la que posee una extensión CSV como se indica con recuadro rojo en la Fig 15. Dentro de esta carpeta se encuentran 5 archivos. En la Tabla 7 se describe su contenido y se demarca con color azul, los archivos implementados en esta metodología.

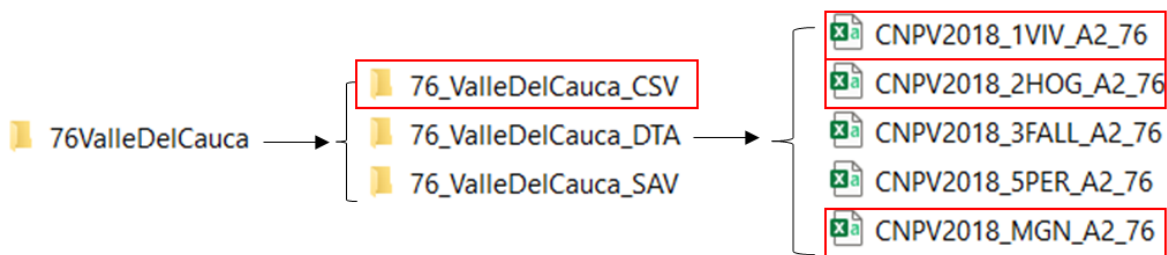


Fig 15. Ruta de archivos utilizados en la construcción del modelo de exposición.

Tabla 7. Archivos dentro de 76_ValleDelCauca_CSV [23].

Nombre archivo	Descripción
CNPV2018_1VIV_A2_76	Archivo con la información de las encuestas asociadas a la vivienda.
CNPV2018_2HOG_A2_76	Archivo con la información de las encuestas asociadas a los hogares.
CNPV2018_3FALL_A2_76	Archivo con la información de las encuestas asociadas a los fallecidos.
CNPV2018_5PER_A2_76	Archivo con la información de las encuestas asociadas a las personas.
CNPV2018_MGN_A2_76	Archivo con la información de las encuestas asociadas a su georreferenciación.

El archivo CNPV2018_1VIV_A2_76 contiene varios parámetros los cuales se preguntaron en las encuestas realizadas a cada una de las viviendas como se muestra en la Tabla 8 . Los parámetros resaltados son los que se incluyeron en la realización del modelo de exposición.

Tabla 8. Parámetros de vivienda evaluados por el CENSO [23].

CNPV2018 1VIV A2 76	
TIPO_REG	Tipo de registro
U_DPTO	Departamento
U_MPIO	Municipio
UA_CLASE	Clase
U_EDIFICA	Número de orden de la Edificación
COD_ENCUESTAS	Código Encuesta
U_VIVIENDA	Número de orden de la Vivienda
UVA_ESTATER	Vivienda en una territorialidad étnica
UVA1_TIPOTER	Tipo de territorialidad étnica
UVA2_CODTER	Código de territorialidad étnica
UVA_ESTA_AREAPROT	Vivienda en un área protegida
UVA1_COD_AREAPROT	Código del área protegida
UVA_USO_UNIDAD	Uso de la Unidad
V_TIPO_VIV	Tipo de vivienda
V_CON_OCUP	Condición de ocupación
V_TOT_HOG	Total, de hogares en la vivienda
V_MAT_PARED	Material predominante en paredes exteriores
V_MAT_PISO	Material predominante en los pisos
VA_EE	Cuenta con servicio de energía eléctrica
VA1 ESTRATO	Estrato de la vivienda (según servicio de energía)
VB_ACU	Cuenta con servicio de acueducto
VC_ALC	Cuenta con servicio de alcantarillado
VD_GAS	Cuenta con servicio de gas natural conectado a red pública
VE_RECBAS	Cuenta con servicio de recolección de basura
VE1_QSEM	Cuántas veces por semana (recolección basura)
VF_INTERNET	Cuenta con servicio de internet (fijo o móvil)
V_TIPO_SERSA	Tipo de servicio sanitario (inodoro)
L_TIPO_INST	LEA Tipo de institución o establecimiento
L_EXISTEHOG	LEA Existencia de hogar
L_TOT_PERL	LEA Total de residentes (no pertenecen a hogares)

Igualmente, el archivo *CNPV2018_2HOG_A2_76* contiene varios parámetros los cuales se preguntaron en las encuestas realizadas a cada uno de los hogares como se presenta en la Tabla 9. Los parámetros resaltados son los que se incluyeron en la realización del modelo de exposición.

Tabla 9. Parámetros de hogares evaluados por el CENSO [23].

CNPV2018_2HOG_A2_76	
TIPO_REG	Tipo de registro
U_DPTO	Departamento
U_MPIO	Municipio
UA_CLASE	Clase
COD_ENCUESTAS	Código Encuesta
U_VIVIENDA	Número de orden de la Vivienda
H_NROHOG	Número del hogar en la vivienda
H_NRO_CUARTOS	Número de cuartos en total
H_NRO_DORMIT	Número de cuartos para dormir
H_DONDE_PREPALIM	Lugar donde preparan los alimentos
H_AGUA_COCIN	Fuente de agua para preparar los alimentos
HA_NRO_FALL	Total, fallecidos en el hogar (2017)
HA_TOT_PER	Total, personas en el hogar

Los archivos *CNPV2018_IVIV_A2_76* y *CNPV2018_2HOG_A2_76* se encuentran todas las encuestas realizadas y los parámetros evaluados según la Tabla 8 y la Tabla 9. Sin embargo, dentro de estos archivos no se tiene una georreferenciación a nivel de manzana, por lo cual es necesario vincular el archivo *CNPV2018_MGN_A2_76*, donde se puede asociar cada encuesta con su *COD_ENCUESTAS* con una manzana georreferenciada [23], tal como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros evaluados por el CENSO para el MGN [23].

CNPV2018_MGN_A2_76	
U_DPTO	Departamento
U_MPIO	Municipio
UA_CLASE	Clase
UA1_LOCALIDAD	Localidad/Comuna
U_SECT_RUR	Sector Rural
U_SECC_RUR	Sección Rural
UA2_CPOB	Centro Poblado
U_SECT_URB	Sector Urbano
U_SECC_URB	Sección Urbana
U_MZA	Manzana
U_EDIFICA	Número de orden de la Edificación
COD_ENCUESTAS	Código Encuesta
U_VIVIENDA	Número de orden de la Vivienda

Para un mayor entendimiento de la georreferenciación de los datos es necesario conocer el marco geoestadístico Nacional (MGN), el cual se encuentra alineado con la iniciativa de las Naciones Unidas sobre la Gestión de Información Geoespacial [68].

El MGN se estructura a partir de distintas unidades geoestadísticas como departamentos, municipios, cabeceras municipales, centros poblados y zonas rurales dispersas que se delimitan considerando principalmente rasgos naturales y culturales observables en el territorio [49]. Los contornos de los departamentos y municipios que integran el MGN corresponden a los límites oficiales definidos por el el IGAC [69].

El MGN se estructura a partir de distintas unidades geoestadísticas como departamentos, municipios, cabeceras municipales, centros poblados y zonas rurales dispersas que se delimitan considerando principalmente rasgos naturales y culturales observables en el territorio [49]. Los contornos de los departamentos y municipios que integran el MGN corresponden a los límites oficiales definidos por el IGAC [69].

El MGN incorpora diferentes niveles geográficos que permiten organizar y validar estadísticamente la información recopilada, tal como se muestra en la Fig 16. Dichos niveles conforman un sistema jerárquico de codificación que avanza desde las divisiones territoriales más generales, como el departamento, hasta las unidades censales más específicas, como la manzana en zonas urbanas o la sección rural en áreas no urbanas. Este sistema está estructurado mediante 22 campos o posiciones que se detallan e ilustran en la Fig 17.



Fig 16. Niveles geográficos del MGN [69].

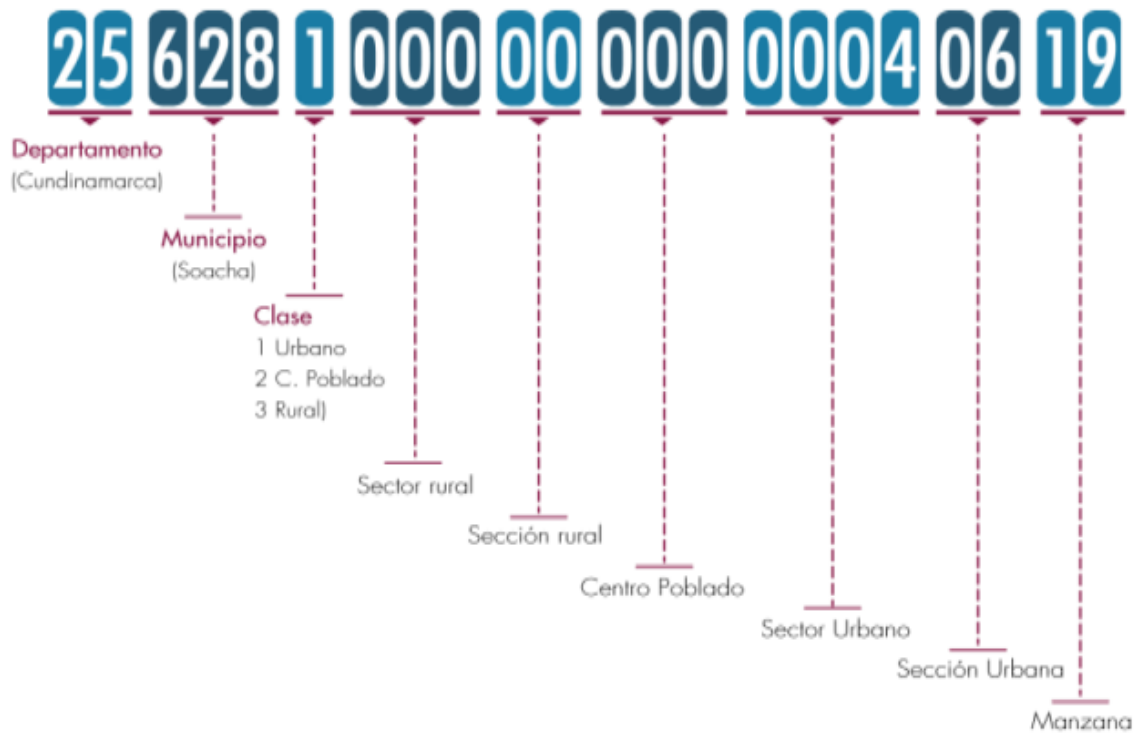


Fig 17. Conformación del código MGN para manzanas [69].

Esta información del código MGN es valiosa ya que permite identificar a que manzana censal corresponden las encuestas descritas en la base de datos de *CNPV2018_IVIV_A2_76* y *CNPV2018_2HOG_A2_76*. Una vez identificadas las viviendas asociadas a una manzana dada, la manipulación de los datos permite agrupar las encuestas pertenecientes a una misma edificación (y por lo tanto determinar el número de edificaciones de cada manzana), logrando así encontrar cual es el estrato de cada una de las edificaciones, su cantidad de viviendas, su población y el material de pared predominante en la edificación.

3.1.2. Encuestas Etapa I (2017) y II (2019)

El DAPM (Departamento administrativo de planeación municipal) de la ciudad de Santiago de Cali en el año 2017 contrató a la Corporación Osso para la realización de un estudio que recibió por nombre “Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo por Sismos en la Zona Urbana del Municipio Santiago de Cali, Primera Etapa”. Este estudio se centró en una franja de la ciudad en sentido oriente occidente, reuniendo parcialmente 6 comunas diferentes con diferentes estratos.

En este estudio predominan las edificaciones de uso residencial de baja altura, inspeccionando a través de encuestas detalladas presencialmente 4,921 edificaciones. En la Fig 18, mapa izquierdo, se puede visualizar la franja de estudio en color azul.

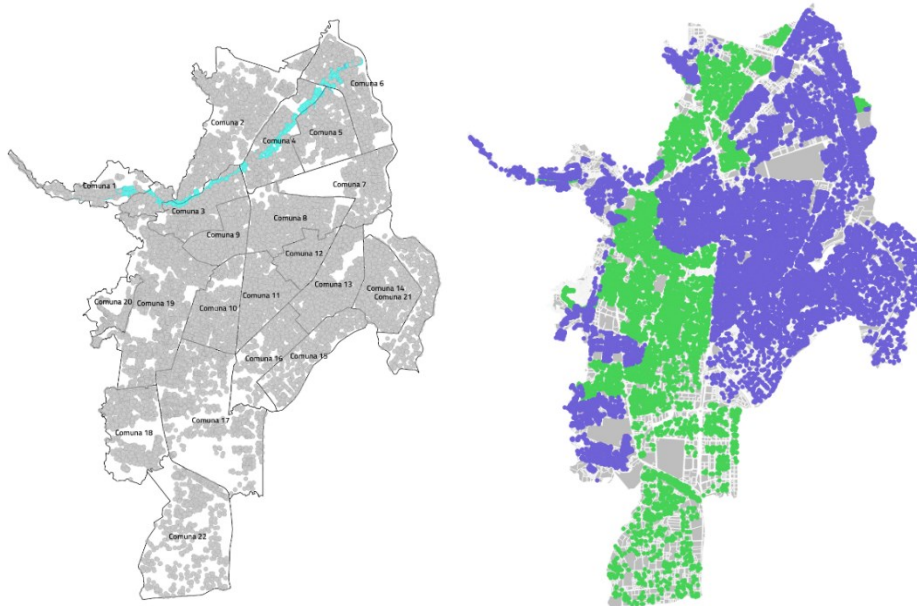


Fig 18. Encuestas realizadas en las Etapas I y II del estudio de riesgo de Cali gestionado por DAPM.

Izquierda: franja de estudio Etapa I: en azul se indican las edificaciones encuestadas; derecha: en morado y verde se visualizan las encuestas realizadas en la Etapa II.

Posteriormente en el año 2019 el DAPM quiso continuar con el estudio expandiéndolo a toda la ciudad de Santiago de Cali a través del contrato de consultoría no. 4132.010.26.1.684 de 2019 con la empresa CI AMBIENTAL. Este estudio incluyó la clasificación de construcciones en toda la ciudad, para lo cual se realizaron 24,543 encuestas digitales a través de imágenes satelitales. En la Fig 18, mapa derecho, se presenta la localización de las encuestas, las edificaciones que se encuentran en color verde no tienen una adecuada georreferenciación debido probablemente a errores durante el amarre geográfico.

3.2.TIPOLOGÍAS SEGÚN LA TAXONOMÍA GEM IDENTIFICADAS EN SANTIAGO DE CALI

Las encuestas de la Etapa I y de la Etapa II constituyen una fuente importante de información para un mayor conocimiento de la exposición de las edificaciones de la ciudad y la vulnerabilidad que estas tienen. Estos trabajos brindan una buena base de datos de encuestas de las edificaciones que permiten la realización o continuación de los estudios previamente mencionados. Por esta razón estas encuestas se toman como insumo del presente trabajo.

En las encuestas se encontraron datos como el estrato socioeconómico, cantidad de pisos, material de construcción, uso de la estructura, sistema estructural o sistema de resistencia lateral y para algunas encuestas se contó con año de construcción. Dentro de los materiales de los sistemas estructurales se encontraron adobe, concreto, mampostería, acero y madera como se visualiza en la Tabla 11; en la Tabla 12 se presenta los sistemas estructurales de resistencia lateral como podría ser el caso de pórticos de vigas y columnas de materiales como el acero o el concreto reforzado, o sistema de muros que podrían ser vaciados en concreto o con mampostería, entre otros. En ambas tablas se presenta la convención según la taxonomía de GEM [70], la cual contiene varios atributos que permiten clasificar a las edificaciones con miras a la evaluación del riesgo sísmico. Cada atributo corresponde a una característica específica que afecta al comportamiento sísmico de un edificio.

Tabla 11. Materiales de los sistemas estructurales de las encuestas de los estudios de riesgo sísmico (Etapas I y II).

MATERIAL	CONVENCIÓN
Adobe o tapia pisada	ADO
Concreto reforzado	CR
No definido o mezclas de materiales	MATO
Mampostería confinada	MCF
Mampostería reforzada	MR
Mampostería simple o no reforzada	MUR
Acero	S
Madera	W

Tabla 12. Sistema estructural de resistencia lateral.

SISTEMA DE RESISTENCIA LATERAL	CONVENCIÓN
Muros	LWAL
Sistema aporticado de columnas y vigas	LFM
Sistema aporticado de columnas y vigas con muros de relleno	LFINF
Sistema dual con pórticos y muros	LDUAL
Sin sistema definido	LO
Sistema aporticado con riostras	LFBR

En la Tabla 13 se presenta la taxonomía que se implementará en este trabajo, en donde se definen las tipologías estructurales según el sistema de resistencia a cargas laterales y el material de dicho sistema. Las tipologías también incluyen el nivel de ductilidad y un estimado de la altura en base a la cantidad de viviendas, como se verá más adelante.

Tabla 13. Tipologías con su respectiva taxonomía GEM [70].

TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL	TAXONOMÍA (Material/ Sistema de resistencia lateral)
Muros de adobe	ADO/LWAL
Sistema dual en concreto reforzado	CR/LDUAL
Pórticos de concreto reforzado con muros de relleno	CR/LFINF
Pórticos de concreto reforzado	CR/LFM
Muros vaciados en concreto reforzado	CR/LWAL
Muros de mampostería simple o no reforzada	MUR/LWAL
Muros de mampostería reforzada	MR/LWAL
Muros de mampostería confinada	MCF/LWAL
Pórticos arriostrados de acero	S/LFBR
Pórticos de acero	S/LFM
Acero sin sistema definido	S/LO
Madera sin sistema definido	W/LO
Otras tipologías	MATO/LO

A continuación, se presentan las tipologías según la taxonomía GEM encontradas en la ciudad de Santiago de Cali a partir de los análisis de las encuestas para edificaciones residenciales, identificando 10 tipologías diferentes, definidas según el material y tipo del sistema de resistencia a cargas laterales. Se desprecian las tipologías con material de acero (S) debido a su escaso uso para edificaciones residenciales, quedando así 8 tipologías. Para cada tipología se describe el tipo de ductilidad que puede tener asociada, identificando cuatro niveles diferentes: sin ductilidad (DNO), ductilidad baja (DUL), ductilidad media (DUM) y ductilidad alta (DUH). La ductilidad está relacionada con el tipo de construcción (formal o informal): las edificaciones informales usualmente no tienen un buen desempeño sísmico (sin ductilidad o ductilidad baja), por su parte, las edificaciones diseñadas y construidas bajo los lineamientos de las normas sismorresistentes recientes (NSR-98 y NSR-10) se espera que tengan una ductilidad alta (debido a que Santiago de Cali se encuentra en una zona de amenaza sísmica alta). En cuanto a las edificaciones construidas con los requerimientos de la norma de 1984, se espera que tengan un nivel de ductilidad bajo o medio.

Sistema de muros en adobe (ADO/LWAL)

Las edificaciones que presentan sistema estructural de muros en adobe no están permitidas por los códigos sismo resistentes y menos para zonas de amenaza alta, como lo es Santiago de Cali. Las edificaciones de este tipo por lo general fueron construidas antes de la aplicación de las normas sismo resistentes en el país, por lo cual no presentan una ductilidad (DNO). Estas construcciones son muy comunes en estratos 1 y 2. En este tipo de sistema también se está agrupando las edificaciones en tapia y en bareque debido a su comportamiento similar.

Este tipo de edificaciones por lo general son de 1 y 2 pisos. La altura de sus muros tiende a ser más alta que el promedio de la mampostería moderna al igual que el espesor de las paredes o muros. En la Fig 19 se muestra un ejemplo de una edificación de adobe y en la Fig 20 una edificación de tapia en la ciudad de Santiago de Cali.



Fig 19. Construcción de muros en adobe sin ductilidad presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.



Fig 20. Construcción de muros de tapia sin ductilidad presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2022.

Sistema de pórticos en concreto resistentes a momento (CR/LFM)

Los sistemas de pórticos de concretos resistentes a momento constan de la unión de elementos de concreto reforzado tipo viga con elementos tipo columna, los cuales son los encargados de brindar soporte contra las cargas gravitacionales y las cargas laterales. Los sistemas de pórticos resistentes a momento se caracterizan por tener grandes vanos de ventanas, demarcaciones de las columnas y vigas en forma de patrones reticulares. Esto se evidencia en las uniones de diferentes materiales con la aplicación de juntas de dilatación como se puede visualizar en la Fig 21 [71]. Adicionalmente, se podría tener tres tipos de pórticos, con ductilidad alta (DUH), con ductilidad media (DUM) y con ductilidad baja (DUL), los cuales pueden diferenciarse por el número de pisos y por los acabados de la edificación, debido a que los pórticos con ductilidad baja son edificaciones con menor número de pisos que los pórticos dúctiles y tienden a tener materiales o acabados menos contemporáneos, a continuación en la Fig 22 y en la Fig 23 se puede visualizar ejemplos de pórticos con diferentes ductilidades [59].



Fig 21. Edificación de pórtico de concreto resistente a momentos. Resaltado en rojo las juntas de dilatación, © Google 2022.



Fig 22. Edificación de pórtico con ductilidad baja presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2022.



Fig 23. Edificación de pórtico con ductilidad alta presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.

Pórticos de concreto con muros de relleno (CR/LFINF)

Los pórticos de concreto con muros de relleno se componen de los marcos generados a partir de la unión de vigas y columnas, los cuales son rellenos con muros mampostería que por la gran rigidez en su plano no permiten la deflexión de los elementos del pórtico, cambiando así su desempeño estructural ante cargas laterales. Por ende, se genera un comportamiento más orientado hacia un pórtico arriostrado [72]. Este sistema puede presentar menor cantidad de aberturas en alguno de los sentidos de la edificación. De igual manera este sistema podría presentarse con ductilidad alta (DUH), con ductilidad

media (DUM) y con ductilidad baja (DUL), los cuales se distinguen principalmente por la cantidad de niveles que alcanzan y por las características de sus acabados. En general, los pórticos con baja ductilidad suelen corresponder a construcciones de menor altura en comparación con los más dúctiles, además de presentar terminaciones menos modernas. A continuación, en la Fig 24 y en la Fig 25 se puede visualizar ejemplos de pórticos con diferentes ductilidades.



Fig 24. Edificación de pórtico con muros de relleno de ductilidad baja presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2022.



Fig 25. Edificación de pórtico con muros de relleno de ductilidad alta presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.

Sistema de muros de concreto reforzado (CR/LWAL)

El sistema estructural de muros de concreto reforzado se caracteriza por presentar muros de concreto con varillas de acero, donde la longitud del muro suele ser superior a 6 veces su espesor y son estos muros los que resisten las cargas gravitacionales y laterales. Este sistema tiende a tener una simetría de continuidad en vanos y muros. Adicionalmente, se visualizan menor cantidad de aberturas y de menor tamaño comparado con las edificaciones con sistema estructural de pórticos de concreto y sistemas duales, generando así muros más sólidos. Si al menos dos de las cuatro paredes exteriores parecen sólidas es probable que se trate de una estructura de muros [71] y [59]. Para este sistema estructural se podría tener tres tipos de ductilidad: alta (DUH), media (DUM) y baja (DUL). En la Fig 26 y en la Fig 27 se evidencia un ejemplo de estructura de muros presente en la ciudad.



Fig 26. Construcción con muros de hormigón reforzado y ductilidad media localizada en Santiago de Cali, © Google 2021.



Fig 27. Edificación con muros de hormigón reforzado y alta ductilidad situada en Santiago de Cali, © Google 2022.

Sistema dual de concreto reforzado (CR/LDUAL)

Los sistemas duales en concreto generalmente son edificaciones de mayor altura con respecto a edificaciones aporricadas de concreto. Las edificaciones que presentan este sistema por lo general se encuentran presentes en estratos medio a altos. En estas edificaciones se puede visualizar la presencia de elementos de columnas, vigas y pantallas de muros. Para este sistema estructural se podría tener tres de ductilidades: alta (DUH), media (DUM) y baja (DUL). La Fig 28 presenta un caso ilustrativo de este tipo de edificación en Santiago de Cali, correspondiente a una estructura con alta ductilidad.



Fig 28. Estructura de sistema dual con alta ductilidad ubicada en Santiago de Cali, © Google 2021.

Muros de mampostería no reforzada (MUR/LWAL)

Las edificaciones que presentan sistema estructural de muros de mampostería no reforzada no cumplen con los requisitos de la normativa sismorresistente, especialmente en áreas con alta amenaza sísmica como Santiago de Cali. En consecuencia, este tipo de construcciones suelen ejecutarse sin criterios de ingeniería o antes de la aplicación de las normas sismo resistentes en el país, es decir, 1984, por lo cual este tipo de edificaciones no presentan una ductilidad (DNO). Estas construcciones son muy comunes en estratos 1 y 2.

Estas edificaciones usualmente implementan materiales como mampostería de arcilla o de concreto. Adicionalmente, en la mayoría de las ocasiones en este tipo de edificaciones no se logra ver coherencia constructiva en la continuidad de muros y en el alineamiento de vanos de puertas y ventanas. En la Fig 29 se observa una vivienda de mampostería simple o no reforzada existente en Cali.



Fig 29. Edificación de mampostería no reforzada sin ductilidad de la ciudad de Santiago Cali, © Google 2021.

Muros de mampostería reforzada (MR/LWAL)

Las edificaciones que presentan sistema estructural de muros de mampostería reforzada presentan la implementación de bloques de mampostería con perforación vertical ya sea de arcilla o de concreto, los cuales presentan dovelas de concreto en su interior. Estos muros son los que brindan el soporte de la estructura para las cargas gravitacionales y laterales. Por lo general, corresponden a construcciones de baja altura, que no superan los tres niveles. Adicionalmente, se podría tener tres tipos de sistemas uno con ductilidad alta (DUH), con ductilidad media (DUM) y con ductilidad baja (DUL). La Fig 30 y la Fig 31 muestran casos representativos de este sistema estructural en la ciudad.



Fig 30. Edificaciones de mampostería reforzada con ductilidad baja en Santiago de Cali, © Google 2022.



Fig 31. Edificaciones de mampostería reforzada con ductilidad alta en Santiago de Cali, © Google 2021.

Muros de mampostería confinada (MCF/LWAL)

Las edificaciones que presentan como sistema estructural muros de mampostería confinada puede identificarse por la presencia de elementos de confinamiento vertical como las columnetas en las intersecciones de los muros, en la finalización de muros y en los vanos. También la visualización de elementos de viguetas de amarre en todos los muros y dinteles en los vanos. Esto genera un confinamiento total de cada uno de los muros y le permite brindar el soporte a cargas gravitacionales y laterales. Este tipo de sistema estructural suele encontrarse principalmente en construcciones de baja altura, generalmente entre uno y tres niveles. Adicionalmente, se podría tener tres tipos de sistemas uno con ductilidad alta (DUH), con ductilidad media (DUM) y con ductilidad baja (DUL). En la Fig 32 y en la Fig 33 se presentan ejemplos de este tipo de edificaciones presentes en la ciudad de Santiago de Cali.



Fig 32. Edificación de mampostería confinada con ductilidad baja presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.



Fig 33. Edificación de mampostería confinada con ductilidad media presente en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2021.

Sistema estructural en madera (W/LO)

En la ciudad de Santiago de Cali se presentan de manera escasa edificaciones con sistema estructural de madera que por lo general no se construyen adecuadamente debido a que se realizan de forma informal y sin tener en cuenta las características del material, por lo cual para este trabajo de investigación se consideran sin ductilidad. En la Fig 34 se presenta un ejemplo de este tipo de edificaciones presentes en la ciudad de Santiago de Cali.



Fig 34. Estructuras en madera localizadas en la ciudad de Santiago de Cali, © Google 2022.

Sistema estructural no definido (MATO/LO)

Se presenta en la ciudad algunos casos de edificaciones que no presentan las tipologías estructurales anteriormente mencionadas, se identifican edificaciones hechas con recursos no tradicionales, por ejemplo tierra, piedras o láminas metálicas, las cuales constituyen solo una fracción reducida del inventario habitacional de la ciudad. Este tipo de edificaciones no presentan ductilidad (DNO). En la Fig 35 se visualiza un ejemplo.

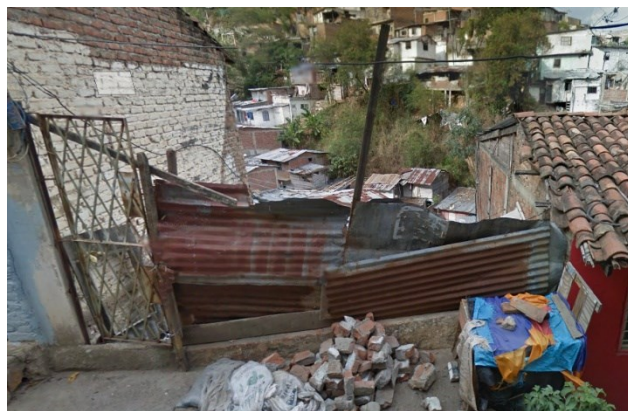


Fig 35. Estructura elaborada con materiales no convencionales ubicada en Santiago de Cali, © Google 2021.

3.2.1. Procesamiento de la información Etapa I y II

Para identificar los porcentajes de distribución de acuerdo con el estrato socioeconómico de cada una de las tipologías estructurales anteriormente mencionadas es necesario dentro de las encuestas de la Etapa I y II conocer el estrato socioeconómico de cada una de las edificaciones encuestadas y relacionar su taxonomía GEM con este parámetro. Esto con el objetivo de vincular posteriormente los datos de las encuestas con la información censal, ya que representan una información valiosa, encontrando que ciertos tipos de tipologías GEM como lo son los sistemas de muros de mampostería se encuentran con mayor frecuencia en estratos bajos y edificaciones de concreto reforzado en los estratos medios y altos.

En la Fig 36 se presenta los estratos socioeconómicos de cada uno de los barrios en la ciudad de Santiago de Cali, entendiendo este como la clasificación a los hogares según condiciones de la vivienda en la que dicho grupo de personas habita y el entorno o zona en la que esta se encuentra.

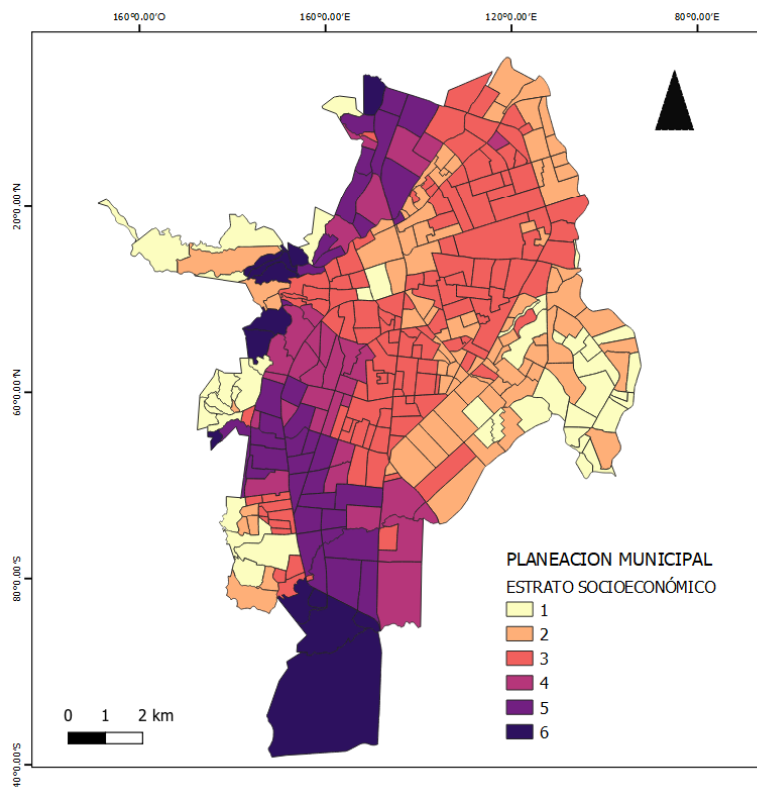


Fig 36. Distribución de estratos socioeconómicos por barrios en Santiago de Cali; datos tomados de [73].

A continuación, en la Tabla 14 y en la Tabla 15 se presenta un resumen de la distribución de porcentajes y encuestas de las diferentes tipologías estructurales según el estrato socioeconómico de la información

obtenida de la Etapa I y Etapa II. Se encuentra un mayor número de los sistemas estructurales que incluyen mampostería en estratos más bajos con respecto a los estratos socioeconómicos altos. En estratos altos predominan edificaciones con sistemas de resistencia a cargas laterales basados en elementos de concreto reforzado.

Tabla 14. Cantidad de encuestas de las etapas I y II según sistema estructural y estrato.

MATERIAL	ADO	CR				MATO	MCF	MR	MUR	S			W	
SISTEMA DE RESISTENCIA LATERAL	LWAL	LDUAL	LFINF	LFM	LWAL	LO	LWAL	LWAL	LWAL	LFBR	LFM	LO	LO	
ESTRATO SOCIOECONÓMICO	1	11	1	76	6	0	0	1683	0	592	0	0	0	23
	2	70	2	777	51	35	11	5964	19	2182	8	22	2	9
	3	14	6	436	94	147	6	5261	167	1507	6	7	0	5
	4	0	15	495	48	23	2	1170	34	400	0	3	0	1
	5	3	41	558	94	6	4	991	22	486	0	3	0	0
	6	3	72	241	111	1	1	414	0	54	0	2	0	1
Total	101	137	2583	404	212	24	15483	242	5221	14	37	2	39	

Tabla 15. Porcentajes de encuestas de la etapa I y II según sistema estructural y estrato.

MATERIAL	ADO	CR				MATO	MCF	MR	MUR	S			W	
SISTEMA DE RESISTENCIA LATERAL	LWAL	LDUAL	LFINF	LFM	LWAL	LO	LWAL	LWAL	LWAL	LFBR	LFM	LO	LO	
ESTRATO SOCIOECONÓMICO	1	0.5%	0.0%	3.2%	0.3%	0.0%	0.0%	70.4%	0.0%	24.7%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%
	2	0.8%	0.0%	8.5%	0.6%	0.4%	0.1%	65.2%	0.2%	23.8%	0.1%	0.2%	0.0%	0.1%
	3	0.2%	0.1%	5.7%	1.2%	1.9%	0.1%	68.7%	2.2%	19.7%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%
	4	0.0%	0.7%	22.6%	2.2%	1.0%	0.1%	53.4%	1.6%	18.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
	5	0.1%	1.9%	25.3%	4.3%	0.3%	0.2%	44.9%	1.0%	22.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
	6	0.3%	8.0%	26.8%	12.3%	0.1%	0.1%	46.0%	0.0%	6.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%
Total	0.4%	0.6%	10.5%	1.6%	0.9%	0.1%	63.2%	1.0%	21.3%	0.1%	0.2%	0.0%	0.2%	

Adicionalmente, también es importante dimensionar la distribución de porcentajes de las tipologías estructurales con respecto a la altura de las edificaciones (cantidad de pisos), debido a que de esta forma se puede saber los sistemas estructurales de resistencia sísmica predominantes de acuerdo a las alturas de las edificaciones, encontrando que sistemas de mayor altura corresponden por lo general a edificaciones en concreto y las de menor altura en un porcentaje muy alto a edificaciones de mampostería. En la Tabla 16 y en la Tabla 17, se evidencian la cantidad de edificaciones y porcentajes de la distribución de las alturas según el sistema de resistencia lateral.

Tabla 16. Cantidad de encuestas de las etapas I y II según sistema estructural y altura.

MATERIAL		ADO	CR				MATO	MCF	MR	MUR	S			W
SISTEMA DE RESISTENCIA LATERAL		LWAL	LDUAL	LFINF	LFM	LWAL	LO	LWAL	LWAL	LWAL	LFBR	LFM	LO	LO
ALTURA (CANTIDAD DE PISOS)	1	61	0	360	25	0	16	3294	2	2717	0	5	2	36
	2	39	0	985	74	0	7	7790	13	1919	7	25	0	3
	3	1	0	641	90	0	1	3842	29	516	6	4	0	0
	4	0	0	254	59	0	0	517	5	58	1	2	0	0
	5	0	0	235	107	188	0	39	180	10	0	0	0	0
	6-10	0	60	88	45	21	0	1	13	1	0	1	0	0
	11+	0	77	20	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	101	137	2583	404	212	24	15483	242	5221	14	37	2	39	

Tabla 17. Porcentajes de encuestas de la etapa I y II según sistema estructural y altura.

MATERIAL		ADO	CR				MATO	MCF	MR	MUR	S			W
SISTEMA DE RESISTENCIA LATERAL		LWAL	LDUAL	LFINF	LFM	LWAL	LO	LWAL	LWAL	LWAL	LFBR	LFM	LO	LO
ALTURA (CANTIDAD DE PISOS)	1	0.9%	0.0%	5.5%	0.4%	0.0%	0.2%	50.5%	0.0%	41.7%	0.0%	0.1%	0.0%	0.6%
	2	0.4%	0.0%	9.1%	0.7%	0.0%	0.1%	71.7%	0.1%	17.7%	0.1%	0.2%	0.0%	0.0%
	3	0.0%	0.0%	12.5%	1.8%	0.0%	0.0%	74.9%	0.6%	10.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%
	4	0.0%	0.0%	28.3%	6.6%	0.0%	0.0%	57.7%	0.6%	6.5%	0.1%	0.2%	0.0%	0.0%
	5	0.0%	0.0%	31.0%	14.1%	24.8%	0.0%	5.1%	23.7%	1.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	6-10	0.0%	26.1%	38.3%	19.6%	9.1%	0.0%	0.4%	5.7%	0.4%	0.0%	0.4%	0.0%	0.0%
	11+	0.0%	74.0%	19.2%	3.8%	2.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Total	0.4%	0.6%	10.5%	1.6%	0.9%	0.1%	63.2%	1.0%	21.3%	0.1%	0.2%	0.0%	0.2%	

En el Anexo A se presenta la relación en proporción de la cantidad de edificaciones de las encuestas de la Etapa I y Etapa II con las variables de estrato y altura o cantidad de pisos correlacionada. Esta relación permitirá posteriormente la vinculación con los datos censales y relacionar la cantidad de pisos con la cantidad de viviendas.

3.3. PARÁMETROS DEL MODELO DE EXPOSICIÓN

Entre los parámetros para la elaboración de modelos de exposición basados en la información censal y encuestas se encuentra la cantidad de edificaciones, el sistema estructural y la población. A continuación, se explica detalladamente el proceso para obtener cada parámetro.

3.3.1. Cantidad de edificaciones

Es importante resaltar que la información censal se encuentra categorizada por encuesta y para esta investigación se utilizaron las encuestas asociadas a vivienda y hogares. La información censal también presenta únicamente edificaciones de uso residencial o mixto (excluyendo edificaciones educativas, comerciales industriales, entre otras).

Para obtener la cantidad de edificaciones por manzana y las encuestas asociadas a cada una de las edificaciones es necesario realizar una serie de procedimientos. A continuación, se enumeran y se muestran los ejemplos respectivos para la ciudad de Santiago de Cali:

1. Leer los datos del archivo *CNPV2018_MGN_A2_76*.
2. Entender la subdivisión del territorio de estudio y su nomenclatura según el Marco Geoestadístico Nacional (MGN), logrando entender que existe un código único para cada manzana (este se conforma como se muestra en la Fig 17). A continuación, en la Fig 37 se ilustra los niveles de resolución de la información que presenta el censo 2018 y como se puede llegar a un número único de manzana.

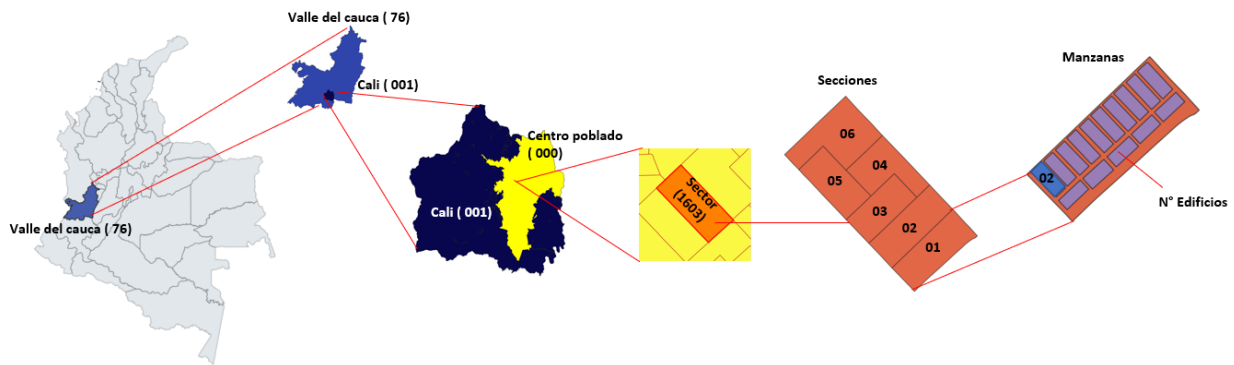


Fig 37. Niveles de resolución del censo 2018.

Para la manzana señalada en la Fig 37 se tiene:

- Departamento: 76- Valle del cauca
- Municipio: 001- Santiago de Cali
- Clase: 1- Urbano
- Sector rural: 000
- Sección rural: 00
- Centro poblado: 000
- Sector urbano: 1603
- Sección urbana: 01
- Manzana: 02

Quedando así para la manzana seleccionada un código 7600110000000016030102

3. En el archivo *CNPV2018_MGN_A2_76* asociar para cada encuesta a que manzana pertenece mediante el código único de manzana formado con los datos del MGN.
4. En el archivo *CNPV2018_VIV_A2_76* filtrar las encuestas asociadas a cada manzana.
5. Para cada manzana identificar la cantidad de *U_EDIFICA* (Número de orden de la Edificación) diferentes.

Para la manzana de ejemplo con código 7600110000000016030102 se encontró según los datos del censo un total de 30 edificaciones con información, lo cual coincide constatando a través de imágenes obtenidas mediante Google Maps y haciendo el recorrido por la manzana como se visualiza en Fig 38.



Fig 38. Imagen satelital de la manzana 7600110000000016030102

A continuación, en la Fig 39 se visualiza la distribución en cantidad de edificaciones por barrio para la ciudad de Santiago de Cali. Encontrando mayor cantidad de edificaciones en los estratos más bajos 1 y 2.

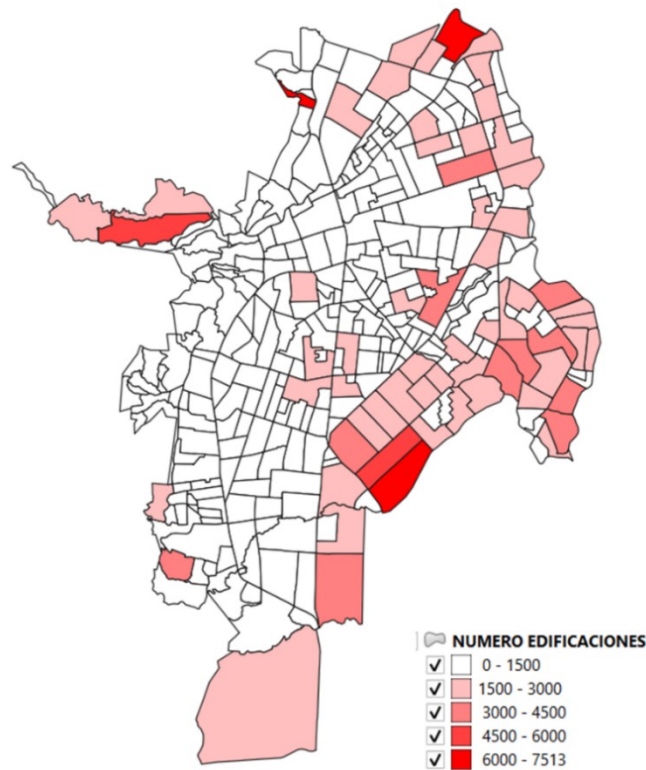


Fig 39. Distribución de la cantidad de edificaciones por barrio en la ciudad de Santiago de Cali.

3.3.2. Sistema estructural de resistencia a cargas laterales

El sistema estructural de resistencia a cargas laterales es el sistema estructural que proporciona resistencia contra las fuerzas sísmicas a través de elementos verticales y horizontales. Este sistema compone una fuente importante de información para la elaboración de un modelo de exposición, ya que dependiendo del sistema de resistencia a cargas laterales que presente la edificación esta podría tener una mejor o menor respuesta ante un evento sísmico.

El primer paso para asignar el sistema estructural de cada edificación es obtener la información relevante del censo, para esto se debe realizar los siguientes procedimientos:

1. Encontrar un código único para cada edificación, realizando la concatenación del código de manzana con el *U_EDIFICA* (Número de orden de la Edificación).
2. Filtrar encuestas por cada código único de edificación.
3. De acuerdo con las encuestas filtradas por cada edificación encontrar el estrato socioeconómico para la edificación con la moda de los datos de las encuestas.

4. De acuerdo con las encuestas filtradas por cada edificación realizar la concatenación del código único de la edificación con el *U_VIVIENDA* (Número de orden de la Vivienda) ya que pueden presentarse varias encuestas para una misma vivienda. De esta forma se encuentra un código único para cada vivienda.
5. Realizar la sumatoria de la cantidad de viviendas únicas por edificación.
6. De acuerdo con las encuestas filtradas por cada edificación encontrar el material de pared predominante para la edificación.

De esta forma se logra obtener el dato de material de pared, estrato y cantidad de viviendas para cada edificación y cada una de estas está asociada a una manzana.

Dentro de los datos encontrados en el censo se tiene la cantidad de viviendas por barrio como se visualiza en la Fig 40. Encontrando una mayor cantidad de viviendas en los estratos 1 y 2. También se puede visualizar en la Fig 41 la distribución del promedio de cantidad de viviendas por edificación para cada uno de los barrios. Logrando comprender los barrios en los que predominan una cantidad baja de viviendas por edificación, lo que está muy ligado a la poca altura de las edificaciones. No obstante, también se evidencian edificaciones con más de 15 viviendas; sin embargo, al promediar por barrio, los valores tienden a limitarse dentro de ese rango.

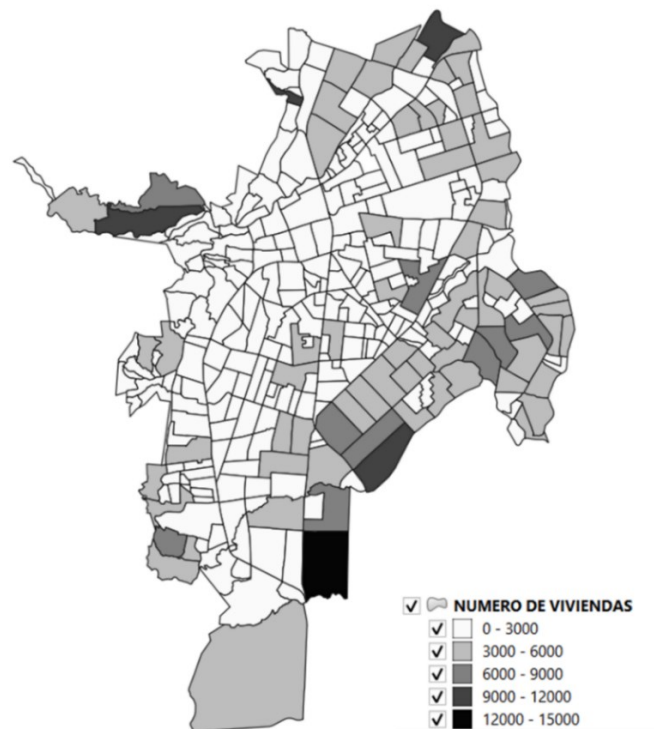


Fig 40. Distribución de la cantidad de viviendas por barrio en la ciudad de Santiago de Cali.

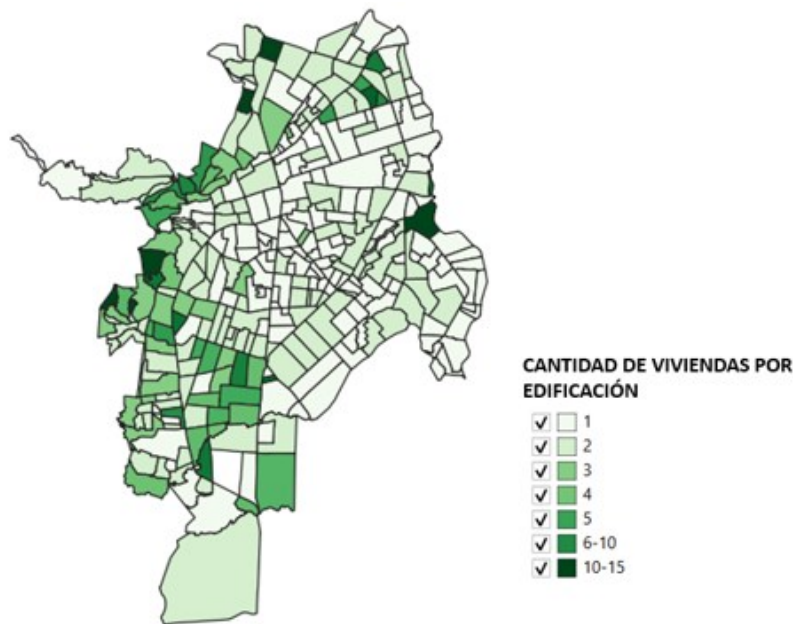


Fig 41. Distribución promedio de la cantidad de viviendas por edificación en cada uno de los barrios de la ciudad de Santiago de Cali.

Adicionalmente se pudo conocer los materiales de pared presentes en la ciudad de Santiago de Cali, los cuales se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Clasificaciones materiales de pared según Censo Población y vivienda 2018 [23].

Material pared	
Clasificación según Censo	Descripción
1	Bloque, ladrillo, piedra, madera pulida
2	Concreto vaciado
3	Material prefabricado
4	Guadua
5	Tapia pisada, bareque, adobe
6	Madera burda, tabla, tablón
7	Caña, esterilla, otros vegetales
8	Materiales de desecho

En la Fig 42 se puede visualizar la distribución de los materiales clasificados por el censo de población y vivienda 2018 por cada uno de los barrios de la ciudad de Santiago de Cali, mostrando el porcentaje de edificaciones construidas con cada tipo de material. Dentro de la imagen se presentan los materiales más representativos como el material 1 (Bloque, ladrillo, piedra, madera pulida), material 2 (Concreto vaciado), material 3 (Material prefabricado), material 5 (Tapia pisada, bareque, adobe) y el material 6 (Madera burda, tabla, tablón). Los materiales 4, 7 y 8 no se presentan debido a la escasez de estos en todo el territorio [23].

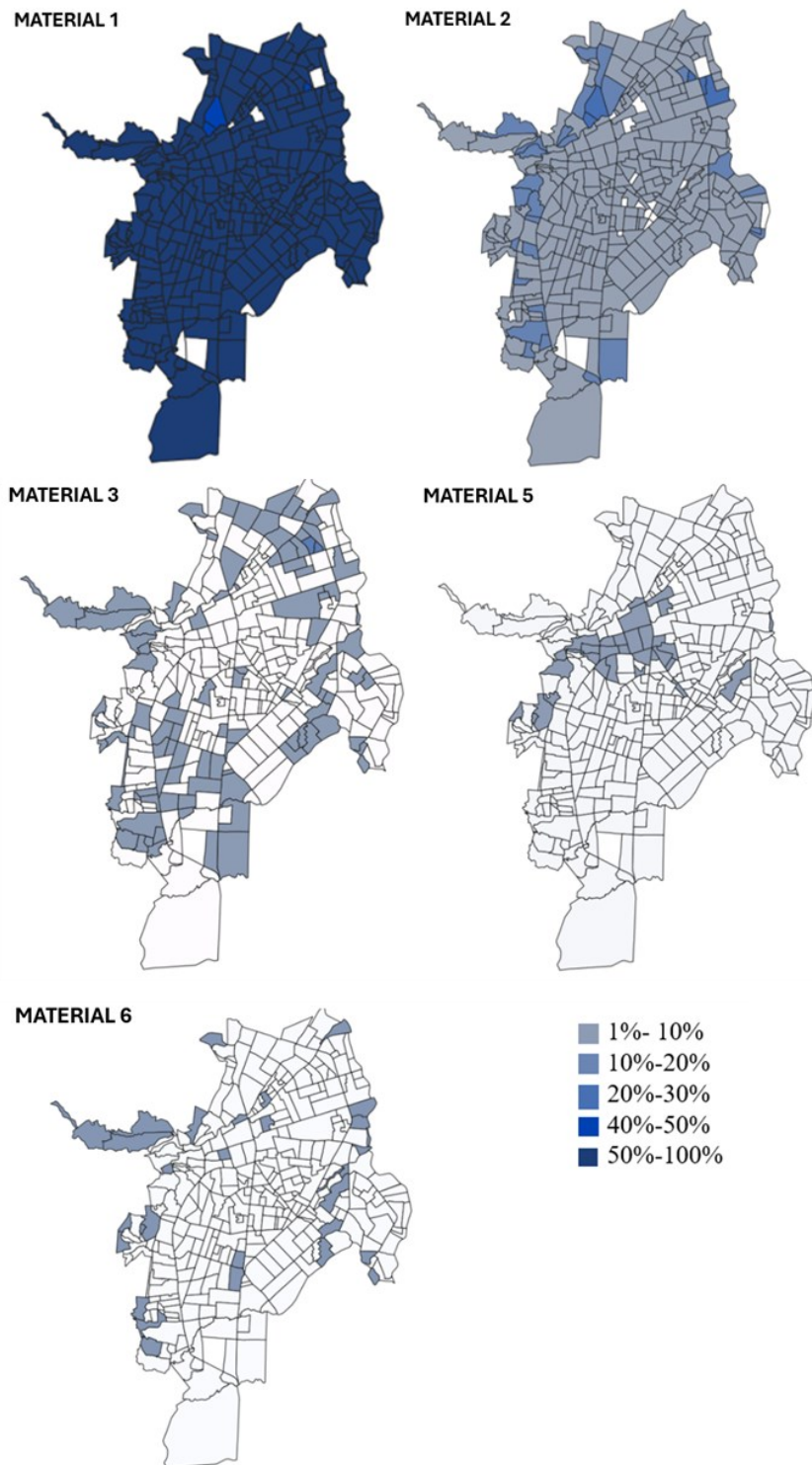


Fig 42. Distribución de los materiales de pared (“1: Bloque, ladrillo, piedra, madera pulida; 2: Concreto vaciado; 3: Material prefabricado; 5: Tapia pisada, bareque, adobe; 6: Madera burda, tabla, tablón” [23]) comunes por barrio en la ciudad de Santiago de Cali.

El material de pared es un recurso crucial por su vinculación con el sistema estructural. Algunos materiales de pared muestran una conexión directa con el sistema de resistencia a cargas laterales, mientras que otros pueden ser utilizados en diversos sistemas estructurales. Por consiguiente, esta información, combinada con encuestas específicas para determinar los porcentajes de distribución de los sistemas estructurales que no tienen una correlación directa, puede ser empleada para inferir la tipología estructural de cada una de las edificaciones.

Los materiales de pared que permiten asignar de manera directa el sistema estructural se listan a continuación, con el respectivo sistema estructural asociado.

A las edificaciones que presenten material de pared 2 (concreto vaciado) se le asigna automáticamente el sistema estructural de resistencia a cargas laterales de muros de concretos vaciados (CR/LWAL). Al material 3 (prefabricado) también se le asignó este sistema debido a que se realizó la revisión de las zonas representativas con este material identificando en Google Street View que las edificaciones correspondían a muros vaciados en concreto de bajas alturas. Por ejemplo, en Fig 43 se puede visualizar que los barrios con mayor porcentaje de esta clasificación de material de pared es Chiminangos I y Chiminangos II y en la Fig 44 y Fig 45 se muestran las edificaciones presentadas en la zona.

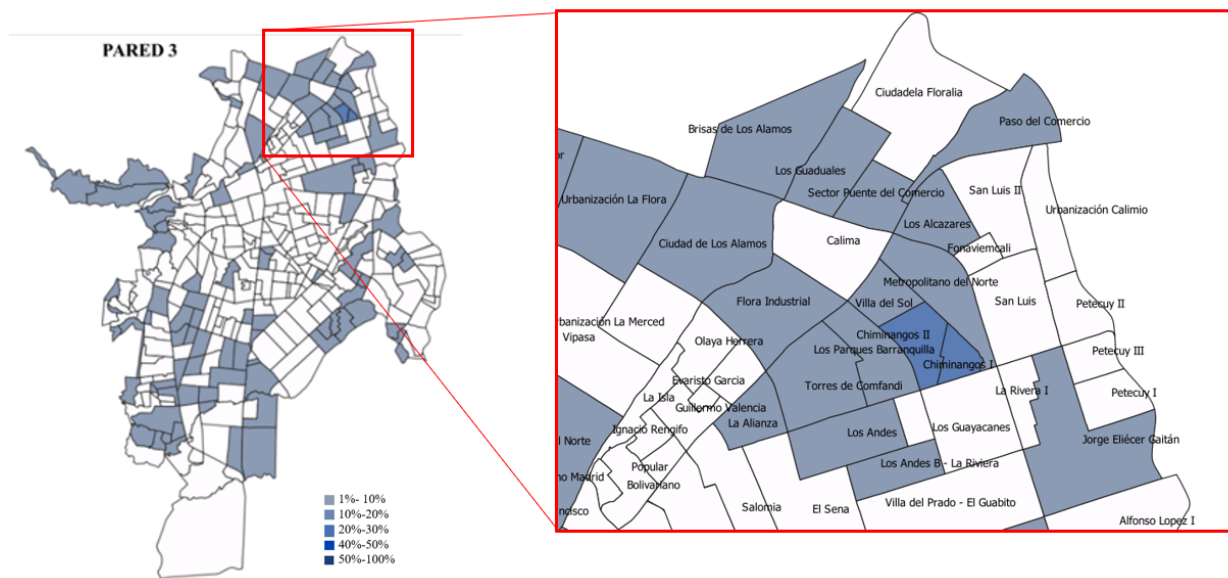


Fig 43. Distribución del material de pared (3: Material prefabricado) por barrio en la ciudad de Santiago de Cali.



Fig 44. Edificaciones comunes en el barrio Chiminango I, Santiago de Cali.



Fig 45. Edificaciones comunes en el barrio Chiminango II, Santiago de Cali.

- A las edificaciones con materiales de pared 4 (guadua), 6 (Madera burda, tabla, tablón) y 7 (caña, esterilla, otros vegetales) se les asignó automáticamente la tipología de sistema no definido en material de madera (W/LO).
- A las edificaciones con materiales de pared 5 (tapia pisada, bareque, adobe) se les asignó automáticamente la tipología de muros de adobe (ADO/LWAL).
- A las edificaciones con materiales de pared 8 (Materiales de desecho) se les asignó automáticamente la tipología de sistema no definido en diferentes materiales (MATO/LO).

Para las edificaciones con los materiales anteriormente descritos se asignó dentro de su taxonomía el material, el sistema de resistencia lateral, ductilidad asociada con el estrato socioeconómico y cantidad de viviendas como se presenta en el Anexo B.

El único material que no permite un directo relacionamiento con el sistema estructural es el material de pared “Bloque, ladrillo, piedra, madera pulida” como se presenta en la Tabla 18 que corresponde a la

clasificación 1 según el Censo; esto debido a que se pueden presentar edificaciones cuyo material de pared sea la mampostería con diversos sistemas estructurales como mampostería no reforzada, mampostería confinada y mampostería reforzada o se podría presentar edificaciones cuya estructura sea de concreto reforzado y presente divisiones en mampostería.

Para el reconocimiento del sistema estructural de resistencia sísmica y material de este sistema de las encuestas asociadas con el material 1 se tuvo la necesidad de crear esquemas de clasificación o *mapping schemes*, los cuales son clasificaciones que se realizan a partir de características que se obtienen con ayuda de bases de datos, encuestas a las edificaciones y criterio de expertos en el tema. Para la realización de estos esquemas se contó con la información de las encuestas realizadas por la Alcaldía de Santiago de Cali que se mencionaron anteriormente, donde se tienen las variables de estrato socioeconómico, cantidad de pisos y sistema estructural. El esquema de clasificación creado plantea un sistema estructural para cada una de las combinaciones posibles con los parámetros censales con la ayuda de las encuestas de las etapas I y II.

Para correlacionar la información de las encuestas con la información censal se planteó la necesidad de relacionar la altura o cantidad de pisos presente en las encuestas y la cantidad de viviendas de la información censal, parámetros importantes para la determinación de los sistemas estructurales de resistencia sísmica.

Para la implementación de esta información se analizaron las encuestas de la Etapa I y Etapa II realizando filtros por la cantidad de pisos de las edificaciones como se visualiza en la Fig 46. Con estos resultados se procedió a realizar encuestas aleatorias por manzanas censales determinando la cantidad de viviendas y validando la cantidad de pisos por edificio que presenta la encuesta con la herramienta Google Street View. La cantidad de edificaciones evaluada fue de 3,348 del total de las encuestas de la Etapa I y Etapa II, lo que corresponde al 11.4%. Tras realizar estas revisiones para cada número de pisos presentes en las encuestas de la Etapa I y Etapa II se encontró distribuciones variadas de la cantidad de pisos por edificación como se visualiza en la

Tabla 19. En particular, se encontraron edificios de hasta 5 pisos con una única vivienda. Esta característica puede explicarse por diversos factores:

- Edificios de uso Mixto: Algunos edificios pueden estar destinados a usos comerciales o mixtos, donde solo uno de los pisos se utiliza como vivienda y el resto para oficinas, locales comerciales o servicios. Este tipo de uso es común en zonas urbanas donde se busca maximizar el aprovechamiento del espacio.

- **Viviendas de Alta Gama:** Algunos edificios pueden estar diseñados como viviendas de lujo, con una única residencia que ocupa todos los pisos. Estas viviendas ofrecen un espacio amplio y exclusivo, a menudo con múltiples niveles y comodidades.
- **Reconversiones o Reformas:** Edificios que originalmente tenían múltiples viviendas pueden haber sido convertidos para tener una sola vivienda por diferentes razones, como cambios en las necesidades de los propietarios, adaptación a nuevas normativas o preferencias personales de los dueños.
- **Errores o Inconsistencias en el Censo:** Existe la posibilidad de errores en la recopilación de datos del censo, donde un edificio fue clasificado incorrectamente o no se tuvo en cuenta el uso real de todos sus pisos. Estos errores pueden ocurrir debido a la complejidad del proceso de recopilación de datos y la interpretación de la información por parte de los encuestadores.
- **Usos Especiales:** Algunas edificaciones pueden tener un uso especial, como embajadas, consulados, o edificios gubernamentales que tienen una sola vivienda destinada para el personal de alto rango, y el resto del edificio para oficinas o actividades institucionales.

La ausencia de una moda en ciertos edificios con una cantidad específica de pisos, como se observa en la

Tabla 19, se puede explicar por la variabilidad en la distribución de la cantidad de viviendas por edificación. En edificios con 11, 14, 15, 17 y 18 pisos, los datos muestran una amplia gama de cantidades de viviendas sin que ningún valor se repita con frecuencia suficiente para establecer una moda.

Entre 1 y 3 pisos
26,773 encuestas



Entre 4 y 6 pisos
2,269 encuestas



Entre 7 y 16 pisos
398 encuestas



Entre 17 y 23 pisos
25 encuestas



Fig 46. Encuestas de la Etapa I y Etapa II por cantidad de pisos.

Tabla 19. Cantidad de viviendas por edificación según la cantidad de pisos.

Cantidad de pisos	Cantidad de encuestas Etapa I y II	Cantidad de edificaciones analizadas	Moda de cantidad de viviendas por edificación	Valor máximo de cantidad de viviendas por edificación	Valor mínimo de cantidad de viviendas por edificación	Media de cantidad de viviendas por edificación	Mediana de cantidad de viviendas por edificación	Desviación estándar
1	7,835	47	1	6	1	1.5	1	1.1
2	12,853	1,302	1	15	1	1.3	1	0.9
3	6,085	1,278	3	18	1	2.7	3	1.6
4	1,194	294	3	15	1	4.3	4	2.2
5	937	156	5	23	1	8.0	6	5.3
6	138	20	21	25	3	17.6	19	6.7
7	52	19	4	65	4	19.5	14	16.4
8	110	57	11	144	7	35.7	24	32.5
9	30	24	13	45	8	18.2	15.5	9.4
10	45	38	13	149	9	44.6	37.5	34.5
11	48	6	--	80	19	44.5	38	29.6
12	60	53	18	113	10	43.6	37	29.2
13	18	18	50	136	11	54.6	49.5	33.9
14	13	13	--	123	10	52.6	50	39.2
15	15	5	--	33	9	21.0	24	12.8
16	6	5	28	69	27	35.8	28	22.1
17	11	3	--	25	17	20.7	20	10.8
18	5	4	--	52	13	25.5	18.5	19.3
19	3	1	14	14	14	14.0	14	9.9
20	1	1	50	50	50	50.0	50	35.4
21	2	1	76	76	76	76.0	76	53.7
22	1	1	83	83	83	83.0	83	58.7
23	1	1	65	65	65	65.0	65	46.0
25	1	1	94	94	94	94.0	94	66.5

Debido a los resultados presentes en la

Tabla 19, y a observaciones realizadas en los cambios de sistemas de resistencia sísmica en base a la altura a lo largo de los diferentes recorridos virtuales realizados, se tomó la decisión de subdividir el esquema de clasificación en cuatro rangos de altura de las edificaciones como se muestra en Tabla 20. Esta clasificación se diseñó para reflejar con precisión la distribución de viviendas en función de la altura de los edificios, asegurando que cada rango represente al menos el 75% de la muestra total.

Para definir estos rangos, se llevó a cabo un análisis detallado de los datos de viviendas por edificación en cada grupo de altura. Se consideró la cantidad de viviendas que representaba al menos el 75% de la muestra de edificaciones dentro de cada categoría de altura para asegurar una caracterización precisa y representativa.

- Primer rango (1 a 3 pisos): La media de viviendas en edificaciones de 1 a 3 pisos es de 2.5. En este grupo, la mayoría de los edificios presentan entre 1 y 3 viviendas. Para asegurar que el rango seleccionado capturara al menos el 75% de la muestra, se observó que 1,427 edificaciones tienen una sola vivienda, 457 tienen dos viviendas y 439 tienen tres viviendas. Juntas, estas cifras cubren una gran parte de la muestra, confirmando que el rango de 1 a 3 viviendas es representativo de la mayoría de los edificios en esta categoría de altura.
- Segundo rango (4 a 5 pisos): Para edificaciones de 4 a 5 pisos, la media de viviendas es de 5.3. El análisis de los datos mostró que el rango que abarca de 4 a 6 viviendas captura al menos el 75% de las edificaciones en este grupo de altura.
- Tercer rango (6 a 14 pisos): En el caso de edificaciones entre 6 y 14 pisos, la media de viviendas es de 37.3. El rango de 7 a 40 viviendas se seleccionó porque incluye al menos el 75% de la muestra de edificaciones en esta categoría de altura. Este intervalo refleja la distribución general de viviendas en edificios de altura media-alta.
- Cuarto rango (más de 15 pisos): Para los edificios con más de 15 pisos, la media de viviendas es de 48.5. Sin embargo, se observó que la cantidad de edificaciones en esta categoría es limitada, lo que no permitió una revisión exhaustiva para establecer un rango específico y representativo. Debido a la insuficiencia de datos para definir un intervalo preciso para esta altura, se optó por extender el rango del grupo anterior. En lugar de definir un rango específico para los edificios de más de 15 pisos, se decidió continuar con el rango definido previamente para edificaciones de altura media-alta, que es de 7 a 40 viviendas. Esto llevó a la creación de un nuevo rango que incluye "más de 41 viviendas" para los edificios con más de 15 pisos. Esta decisión permitió mantener una continuidad lógica en la clasificación, asegurando que los datos disponibles se integraran de manera coherente en el análisis general. Al extender el rango del grupo anterior, se garantiza que la clasificación siga siendo representativa y útil, a pesar de la falta de datos específicos para los edificios de gran altura.

Este criterio de clasificación, basado en el análisis de datos y en la selección de rangos que incluyen al menos el 75% de la muestra en cada grupo de altura, proporciona una caracterización precisa y coherente

de la distribución de viviendas en función de la altura de las edificaciones. Al centrarse en los intervalos más representativos, el análisis asegura una comprensión clara y útil de las tendencias predominantes en la distribución de viviendas.

Tabla 20. Rangos de asociación de cantidad de viviendas con cantidad de pisos para las edificaciones ubicadas en Santiago de Cali.

CANTIDAD DE PISOS	MEDIA CANTIDAD DE VIVIENDAS	GRUPO DE ALTURA	RANGO VIVIENDAS
1-3	2.5	baja	1-3
4-5	5.3	media	4-6
6-14	37.3	media - alta	7-40
≥15	48.5	alta	>41

Con esta asociación se procede a evaluar según las encuestas de la Etapa I y Etapa II cuál es la distribución de los sistemas de resistencia sísmica con material de pared 1 asociados a los estratos según cada uno de los rangos determinados de cantidad de pisos como se muestra en la Tabla 21. En el Anexo A se presenta una tabla detallada de los parámetros de altura o cantidad de pisos y estrato socioeconómico y sistema estructural, separando así las edificaciones encuestadas en la Etapa I y Etapa II. En el Anexo C se puede observar una distribución ampliada incluyendo los niveles de ductilidad.

Los esquemas presentes en la Tabla 21 hacen referencia a:

ESQUEMAV-## (rango de cantidad de viviendas por edificación) **_E-##** (estrato edificación)

Por ejemplo, se le asigna el ESQUEMAV-1-3_E-1-2 a edificaciones que presenten entre 1 y 3 viviendas y que se encuentren en estrato 1 o 2 de acuerdo con los datos censales.

Tabla 21. Esquema de clasificación detallado para edificaciones con material de pared 1 según el censo.

MATERIAL			CR			MCF	MR	MUR
SISTEMA ESTRUCTURAL DE RESISTENCIA LATERAL			LDUAL	LFINF	LFM	LWAL	LWAL	LWAL
ESQUEMA	ESTRATO	NUMERO DE VIVIENDAS POR EDIFICACIÓN						
ESQUEMAV-1-3_E-1-2	1-2	1-3				65%	5%	30%
ESQUEMAV-4-6_E-1-2		4-6			15%	60%	5%	20%
ESQUEMAV-6-40_E-1-2		6-40	20%	20%	60%			
ESQUEMAV-+41_E-1-2		+41	80%	10%	10%			
ESQUEMAV-1-3_E-3-4	3-4	1-3			5%	70%	5%	20%
ESQUEMAV-4-6_E-3-4		4-6		40%	15%	35%	5%	5%
ESQUEMAV-6-40_E-3-4		6-40	15%	65%	15%		3%	2%
ESQUEMAV-+41_E-3-4		+41	65%	25%	10%			
ESQUEMAV-1-3_E-5-6	5-6	1-3		25%	5%	50%	5%	15%
ESQUEMAV-4-6_E-5-6		4-6		55%	30%	10%	5%	
ESQUEMAV-6-40_E-5-6		6-40	40%	32%	28%			
ESQUEMAV-+41_E-5-6		+41	80%	15%	5%			

De esta forma las edificaciones que presentan el material 1 se le asignaran diferentes esquemas de clasificación y de acuerdo con este se le asignan los porcentajes de probabilidad de los sistemas de resistencia sísmica que corresponden junto con su ductilidad. En el Anexo C se presenta un esquema de clasificación detallado, incluyendo la ductilidad.

Se resalta que para la obtención del modelo final se puede contar con una subdivisión de una edificación en varias tipologías estructurales según la probabilidad del esquema de clasificación obtenido mediante las encuestas y según los datos del censo para la edificación evaluada (cantidad de viviendas o altura aproximada, estrato socioeconómico y material de pared). Esta elección se fundamenta en la necesidad de capturar con mayor precisión la distribución de tipologías estructurales en la zona analizada.

El propósito central de este modelo de exposición es servir como herramienta en el análisis del riesgo sísmico y, a partir de ello, anticipar posibles consecuencias tales como pérdidas económicas o impactos sobre la población en un escenario de sismo. Al distribuir una edificación en porcentajes de tipologías estructurales, se obtiene una determinada cantidad de edificaciones por tipología. Esto es equivalente a definir para cada edificación una tipología específica como lo hacen otros modelos de exposición, de manera que, al sumar los resultados por manzana, se refleje el mismo nivel de exposición y riesgo. Los

resultados obtenidos con este enfoque son comparables y, en muchos casos, similares a los que se obtendrían asignando una única tipología a cada edificación.

Este modelo facilita una planificación más eficaz y precisa en términos de mitigación y respuesta ante desastres sísmicos, al tiempo que se preserva la capacidad de comprender las probabilidades asociadas a los distintos sistemas estructurales presentes en la zona analizada.

3.3.3. Población

La población es un factor importante dentro de un modelo de exposición ya que son las personas que habitan cada edificación las que podrían estar en riesgo de sufrir heridas o fallecer frente al comportamiento de cada una de esas edificaciones ante un evento sísmico y adicionalmente es de vital importancia conocer la distribución de la población para la creación de planes de evacuación adecuados, generación de estrategias de atención a la emergencia, etc. Usualmente la asignación de la población a cada edificio se realiza a partir de la población según datos censales a nivel de barrio o comuna. En algunos casos como el modelo de exposición sísmica de viviendas de Medellín [59] se distribuye la población según el área construida. Sin embargo, con los datos actuales del censo de población y vivienda 2018 se puede conocer la cantidad de personas por cada edificación, debido al conteo de personas registradas en las encuestas asociadas a cada edificación.

Para conocer la cantidad de personas por edificación es necesario realizar los siguientes pasos:

1. En el archivo *CNPV2018_HOG_A2_76* filtrar las encuestas asociadas a cada manzana.
2. Encontrar un código único para cada edificación, realizando la concatenación del código de manzana con el *U_EDIFICA* (Número de orden de la Edificación).
3. Filtrar encuestas por cada código único de edificación.
4. De acuerdo con las encuestas filtradas por cada edificación realizar la sumatoria de *HA_TOT_PER* de los datos de las encuestas. Obteniendo así la cantidad de personas por edificación.
5. Dado que cada edificación tiene una probabilidad asociada a distintos sistemas estructurales, es necesario distribuir proporcionalmente la población total que habita en cada una de ellas entre los sistemas estructurales posibles.

En otras palabras, si una edificación tiene una mayor probabilidad de pertenecer a un tipo estructural específico (por ejemplo, pórtico de concreto o mampostería confinada), entonces una mayor proporción de sus ocupantes se asigna a dicho sistema.

De esta forma se encuentra una cantidad de personas que habitan una edificación. En la presente investigación no se tiene la necesidad de distribuir la población en base a la altura y área construida como se realiza en investigaciones pasadas, ya que se cuenta con la población de cada edificio y no con la población distribuida en un área. A continuación, en la Fig 47 se muestra la distribución de la población según el estrato socioeconómico

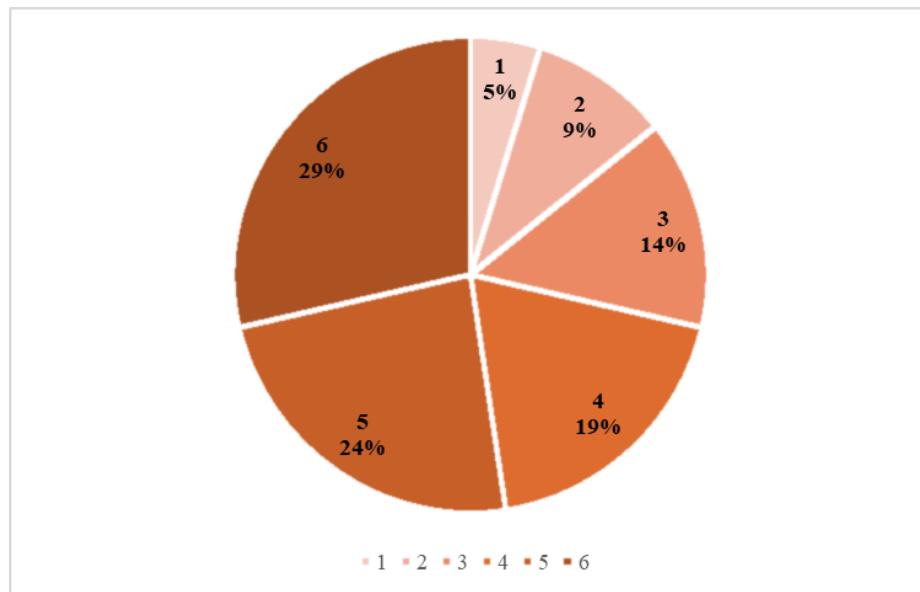


Fig 47. Distribución de la población por estrato socioeconómico en la ciudad de Cali, [23].

En la Fig 48 visualiza el promedio de personas por edificación en cada barrio de la ciudad de Cali. Se encuentra una mayor cantidad de personas por edificación en estrato medio a alto, ya que en algunas de estas zonas es donde se encuentran concentrados las edificaciones de mayor altura en la ciudad. Esto contrasta con lo visualizado en la Fig 49, donde se presenta la distribución de la población por barrio, encontrando mayor cantidad de personas en los estratos bajos y en la periferia de la ciudad. Lo que representa más población y a su vez mayor cantidad de edificaciones de baja altura.

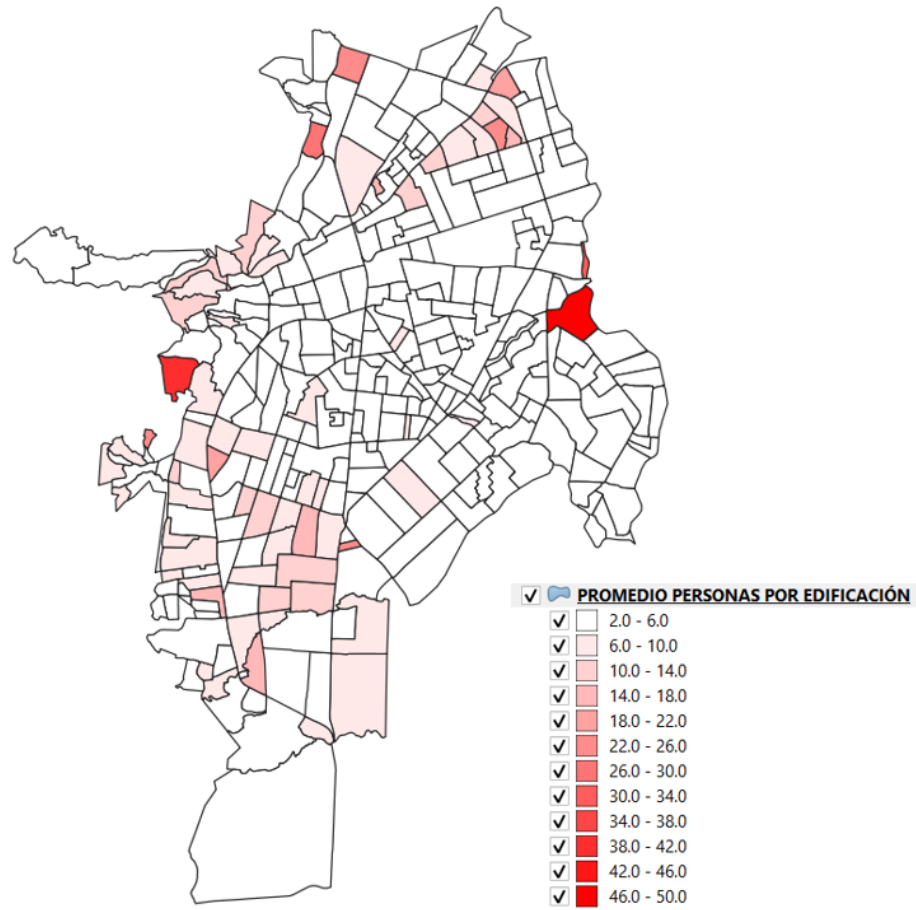


Fig 48. Número de habitantes promedio por edificio en cada barrio de la ciudad de Cali.

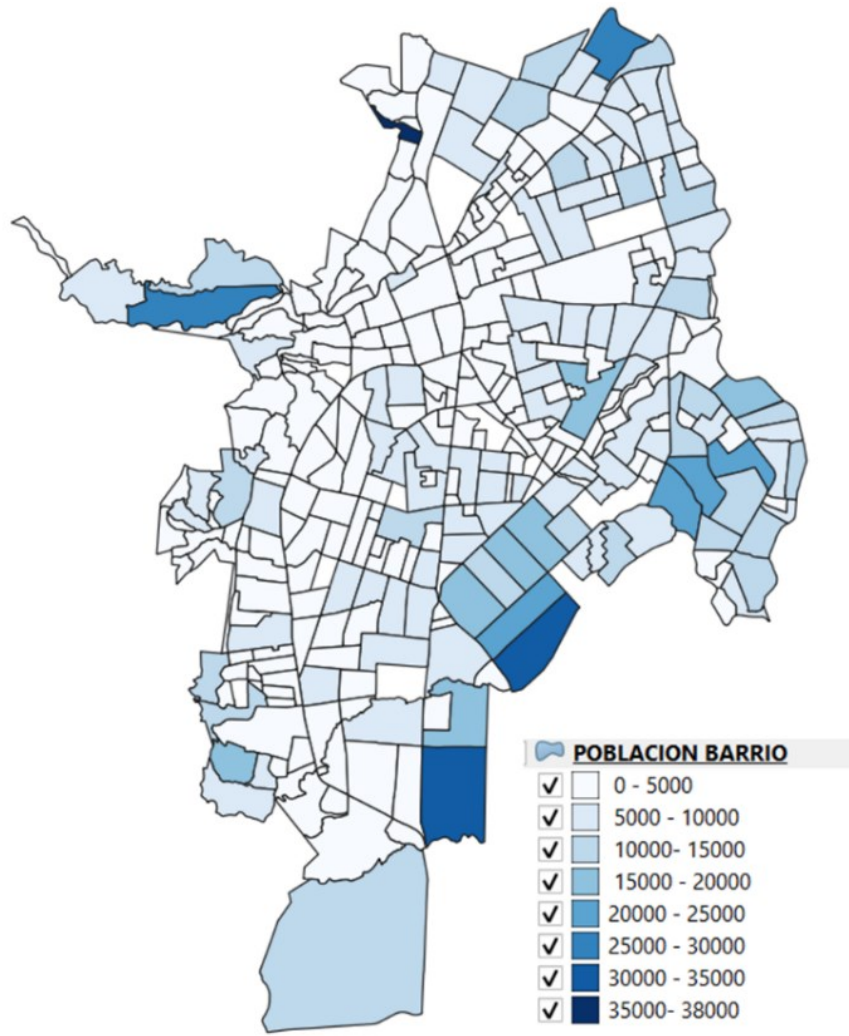


Fig 49. Distribución de la población por barrio en la ciudad de Cali [23].

4. RESULTADOS

4.1. MODELO DE EXPOSICIÓN DE CALI OBTENIDO CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Con base en la metodología propuesta se generó un archivo que concentra la información del inventario de edificaciones residenciales en Santiago de Cali, generados a partir de la información censal y del esquema de clasificación generado a partir de las encuestas de las etapas I y II para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo realizadas por la Alcaldía de Santiago de Cali. Este archivo organiza los datos a nivel de manzana censal, incluyendo cantidad de viviendas, tipo de estructura y estrato socioeconómico. La integración de estos registros constituye el modelo de exposición desarrollado para la ciudad de Santiago de Cali. La Tabla 22 presenta un ejemplo de los campos más representativos de una de las filas del archivo, mientras que la versión completa puede consultarse en el Anexo D.

Tabla 22. Fila resultado del modelo de exposición

Parámetro	Descripción
Longitud	Coordenadas del centroide de la manzana.
-76.5735277	
Latitud	
3.4541933	
Código	Código de la manzana definido por el Censo de Población y Vivienda 2018.
7600110000000001010101	
Taxonomía GEM	Sistema estructural de pórticos de concreto con muros de relleno con ductilidad baja y altura Media.
CR/LFM+DUL/H:Media	
Cantidad de Edificaciones	Número de edificaciones en la manzana correspondiente a la tipología estructural.
0.11	
Número de personas	Número de personas residentes en la manzana correspondiente a la tipología estructural.
1.6	

En la Tabla 22 se puede visualizar que se presenta el número de edificaciones y personas decimales, consecuencia de los cálculos usados para el desarrollo del modelo: el total de edificaciones y habitantes se dividen para una misma edificación según la probabilidad que tiene cada edificación de tener cierto sistema de resistencia sísmica. Por lo cual, si se suma la cantidad de edificaciones por manzana sin tener en cuenta el sistema de resistencia sísmica se tiene como resultado la totalidad de las edificaciones y habitantes en números enteros con los que cuenta la manzana. Los resultados obtenidos con este enfoque son comparables y, en muchos casos, similares a los que se obtendrían asignando una única tipología a

cada edificación y repartiendo la cantidad de las personas en la manzana según la altura de la edificación como se explica en la sección 3.3.2 del presente trabajo. A continuación, se muestran algunos ejemplos de las tipologías encontradas y sus porcentajes de distribución por manzana, contrastado con las imágenes de Google Street View. Por ejemplo, para la manzana de la Fig 50 se puede observar que la gran mayoría de las edificaciones son de mampostería por lo cual los sistemas estructurales arrojados por el modelo corresponden al material de pared. Sin embargo, existen variaciones entre las tipologías estructurales cuya resistencia lateral es brindada por muros de mampostería como la confinada, la reforzada y la mampostería simple. Es posible que se presenten edificaciones con un sistema estructural que realmente no se encuentra dentro de la manzana y esto se debe a que es un modelo determinado a partir de las encuestas. Para esta manzana sí se visualiza que realmente cuenta con viviendas de mampostería confinada, la cual tiene un alto porcentaje, seguido de mampostería no reforzada, lo cual también se visualiza, ya que, se observan edificaciones parcialmente confiadas o confinadas de forma inadecuada sin contar con continuidad entre pisos, sin confinamiento de vanos, por lo cual este tipo de edificaciones se pueden considerar de mampostería simple o no reforzada. Se observa un 18% de MATO ya que la manzana tiene edificaciones con materiales no convencionales como latas, madera de mala calidad entre otros.

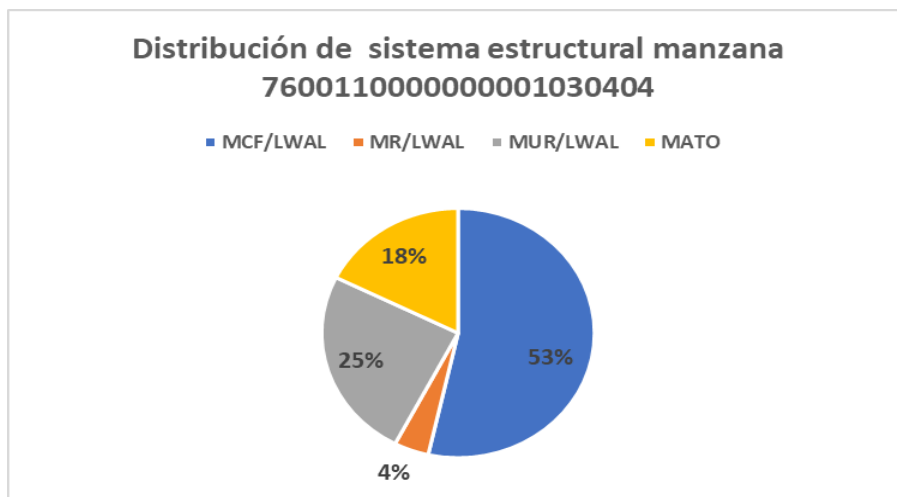
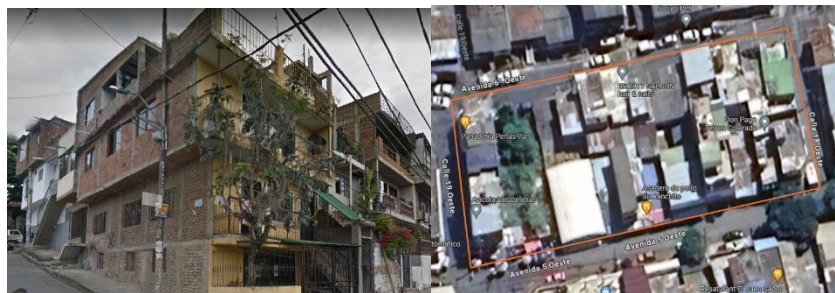


Fig 50. Distribución del sistema estructural para la manzana 760011000000001030404 en la ciudad de Santiago de Cali.

En la Fig 51 se visualiza una manzana un poco más heterogénea en altura. Se encuentra entonces un 84% de sistemas estructurales de mampostería y un 16% de sistemas de concreto, lo cual presenta coherencia por la cantidad de edificaciones de altura vs las edificaciones bajas con una media de dos pisos de altura. Sin embargo, dentro de las edificaciones con sistema estructural de concreto las edificaciones presentes no satisfacen los criterios para tener el sistema de muros vaciados en concreto.

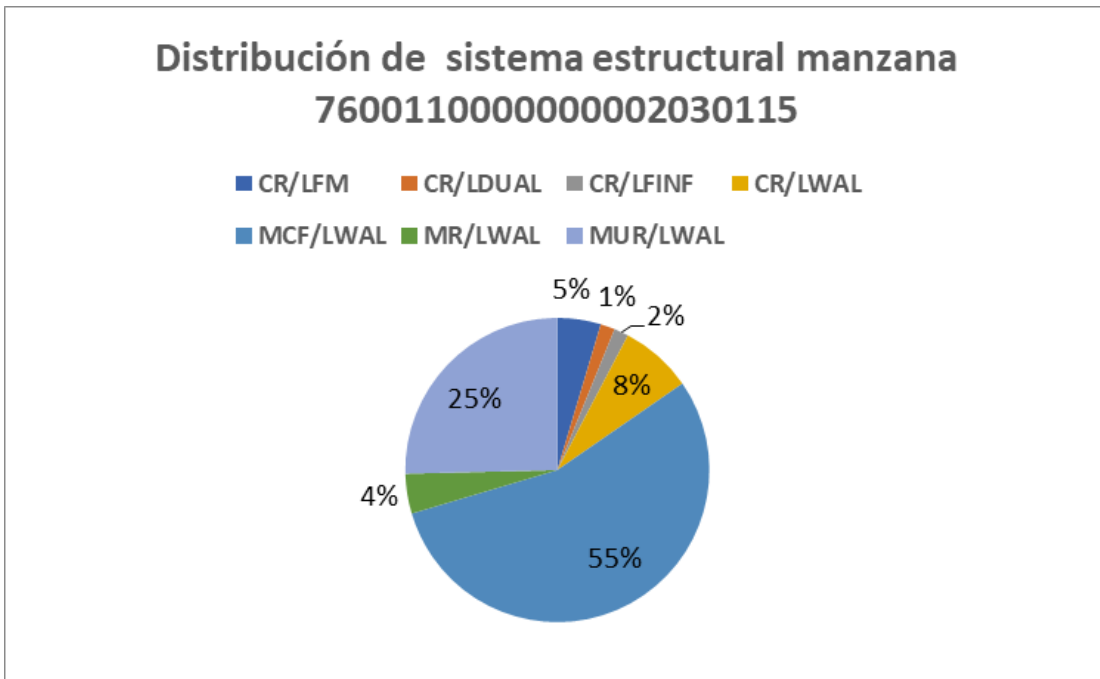
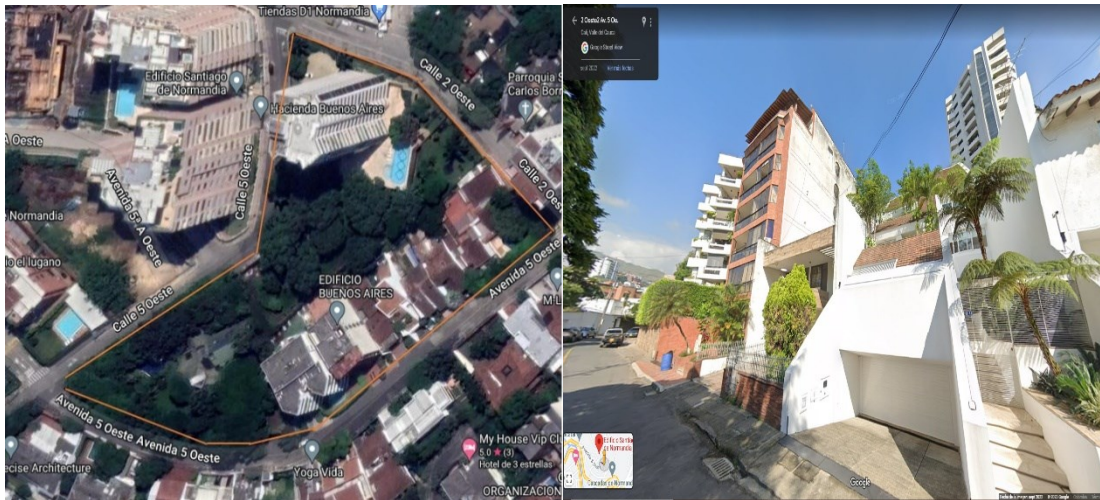


Fig 51. Distribución del sistema estructural para la manzana 760011000000002030115 en la ciudad de Santiago de Cali.

En la Fig 52 se observa lo contrario a la Fig 51, ya que esta manzana presenta mayor cantidad de edificaciones de mayor altura (5 pisos) encontrando así un porcentaje del 84% de sistema estructural en concreto vs un 16% de sistemas de mampostería.

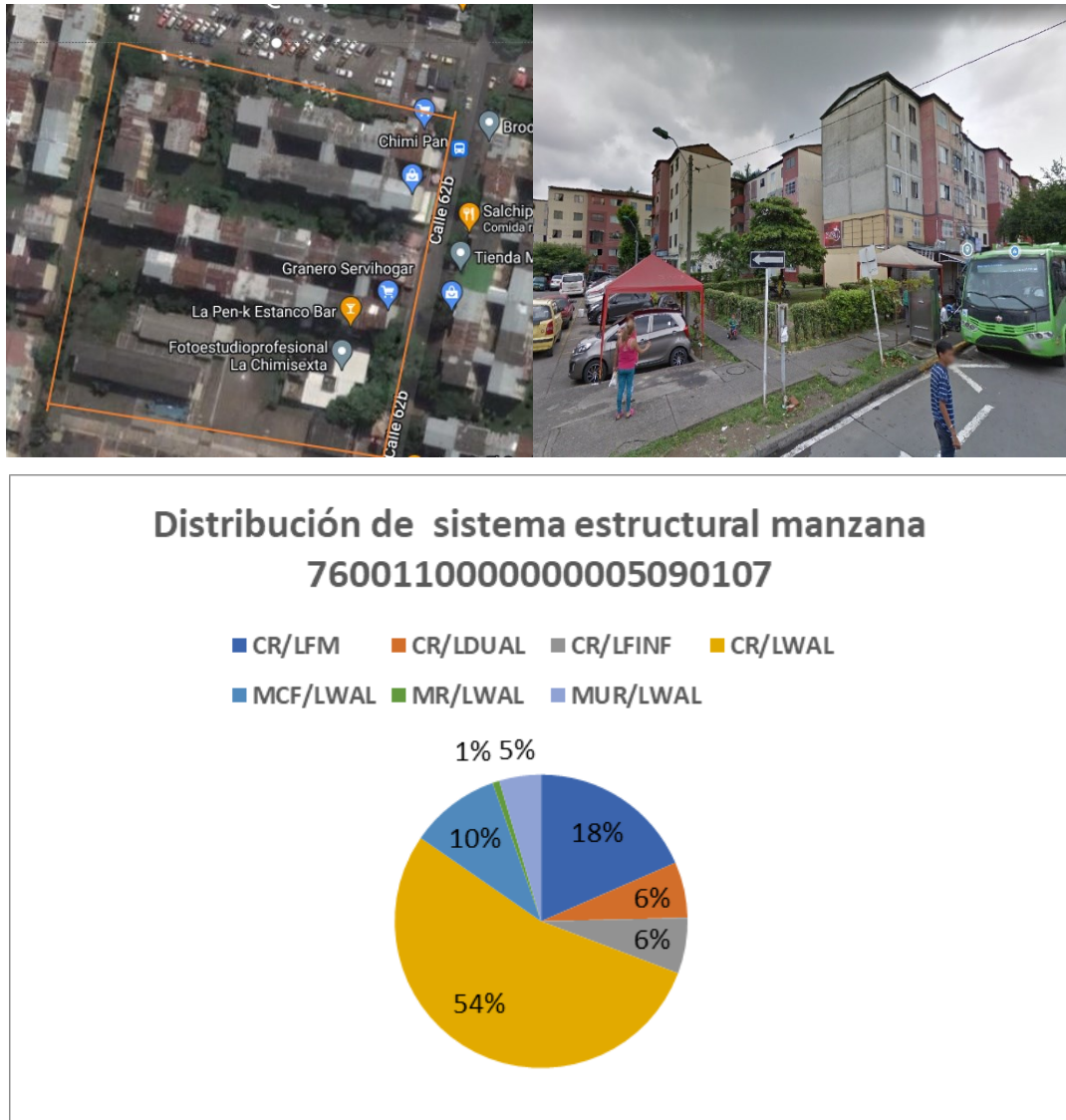


Fig 52. Distribución del sistema estructural para la manzana 760011000000005090107 en la ciudad de Cali.

A partir de la información de cada una de las manzanas de la zona urbana de Santiago Cali, se llegó a que la cantidad de edificaciones es de 326,382 y la cantidad de personas que habitan en ellas es de 1,797,504. En la Tabla 23 se muestran los resultados del modelo clasificados según tipología estructural sin tener en cuenta los rangos de altura, y en la Tabla 24 se presenta el modelo por tipología estructural incluyendo la altura. La Fig 53 muestra la cantidad de edificaciones según tipología estructural por barrio.

Tabla 23. Cantidad de edificaciones y de habitantes por tipología estructural

Sistema Estructural	Cantidad de Edificaciones	Cantidad de Personas o habitantes
ADOBE/LWAL+DNO	539	1,867
CR/LFM+DUL	1,923	51,560
CR/LFM+DUM	2,692	72,185
CR/LFM+DUH	3,077	82,497
CR/LWAL+DUL	10,556	36,604
CR/LWAL+DUM	1,830	6,457
CR/LWAL+DUH	480	19,908
CR/LDUAL+DUL	571	34,989
CR/LDUAL+DUM	800	48,985
CR/LDUAL+DUH	914	55,983
CR/LFINF+DUL	437	16,562
CR/LFINF+DUM	611	23,187
CR/LFINF+DUH	699	26,500
MATO/	21,664	1,542
MCF/LWAL+DUL	45,462	215,848
MCF/LWAL+DUM	63,647	302,187
MCF/LWAL+DUH	72,739	345,356
MR/LWAL+DUL	3,514	16,787
MR/LWAL+DUM	4,919	23,501
MR/LWAL+DUH	5,622	26,859
MUR/LWAL+DNO	82,594	383,845
W/LO+DNO	1,093	4,296
TOTAL	326,382	1,797,504

Tabla 24. Cantidad de edificaciones y de habitantes por tipología estructural y rango de altura.

Tipología estructural	Cantidad de edificaciones	Cantidad de Personas
ADOBE/LWAL+DNO/H: BAJA	525	1,704
ADOBE/LWAL+DNO/H: MEDIA	9	70
ADOBE/LWAL+DNO/H: MEDIA-ALTA	5	93
CR/LFM+DUL/H: MEDIA	651	7,139
CR/LFM+DUL/H: MEDIA-ALTA	1,252	41,789
CR/LFM+DUL/H: ALTA	19	2,632
CR/LFM+DUM/H: MEDIA	912	9,994
CR/LFM+DUM/H: MEDIA-ALTA	1,753	58,505
CR/LFM+DUM/H: ALTA	27	3,685
CR/LFM+DUH/H: MEDIA	1,042	11,422
CR/LFM+DUH/H: MEDIA-ALTA	2,004	66,863
CR/LFM+DUH/H: ALTA	31	4,212
CR/LWAL+DUM/H: BAJA	1,691	4,830
CR/LWAL+DUM/H: MEDIA	139	1,627
CR/LWAL+DUL/H: BAJA	10,359	34,860
CR/LWAL+DUL/H: MEDIA	197	1,744
CR/LWAL+DUH/H: MEDIA-ALTA	446	15,566
CR/LWAL+DUH/H: ALTA	34	4,342
CR/LDUAL+DUL/H: MEDIA-ALTA	417	13,930
CR/LDUAL+DUL/H: ALTA	154	21,059
CR/LDUAL+DUM/H: MEDIA-ALTA	584	19,502
CR/LDUAL+DUM/H: ALTA	215	29,483
CR/LDUAL+DUH/H: MEDIA-ALTA	668	22,288
CR/LDUAL+DUH/H: ALTA	246	33,695
CR/LFINF+DUL/H: MEDIA-ALTA	417	13,930
CR/LFINF+DUL/H: ALTA	19	2,632
CR/LFINF+DUM/H: MEDIA-ALTA	584	19,502
CR/LFINF+DUM/H: ALTA	27	3,685
CR/LFINF+DUH/H: MEDIA-ALTA	668	22,288
CR/LFINF+DUH/H: ALTA	31	4,212
MATO/H: BAJA	21,664	1,542
MCF/LWAL+DUL/H: BAJA	42,856	187,293
MCF/LWAL+DUL/H: MEDIA	2,606	28,554
MCF/LWAL+DUM/H: BAJA	59,999	262,211
MCF/LWAL+DUM/H: MEDIA	3,648	39,976
MCF/LWAL+DUH/H: BAJA	72,739	345,356
MR/LWAL+DUL/H: BAJA	3,297	14,407
MR/LWAL+DUL/H: MEDIA	217	2,380

Tabla 25. Continuación de cantidad de edificaciones y de habitantes por tipología estructural y rango de altura.

Tipología estructural	Cantidad de edificaciones	Cantidad de Personas o habitantes
MR/LWAL+DUM/H: BAJA	4,615	20,170
MR/LWAL+DUM/H: MEDIA	304	3,331
MR/LWAL+DUH/H: BAJA	5,275	23,052
MR/LWAL+DUH/H: MEDIA	347	3,807
MUR/LWAL+DNO/H: BAJA	79,119	345,773
MUR/LWAL+DNO/H: MEDIA	3,474	38,072
W/LO+DNO/H: BAJA	1,053	3,727
W/LO+DNO/H: MEDIA	27	262
W/LO+DNO/H: MEDIA-ALTA	13	307
TOTAL	326,382	1,797,504

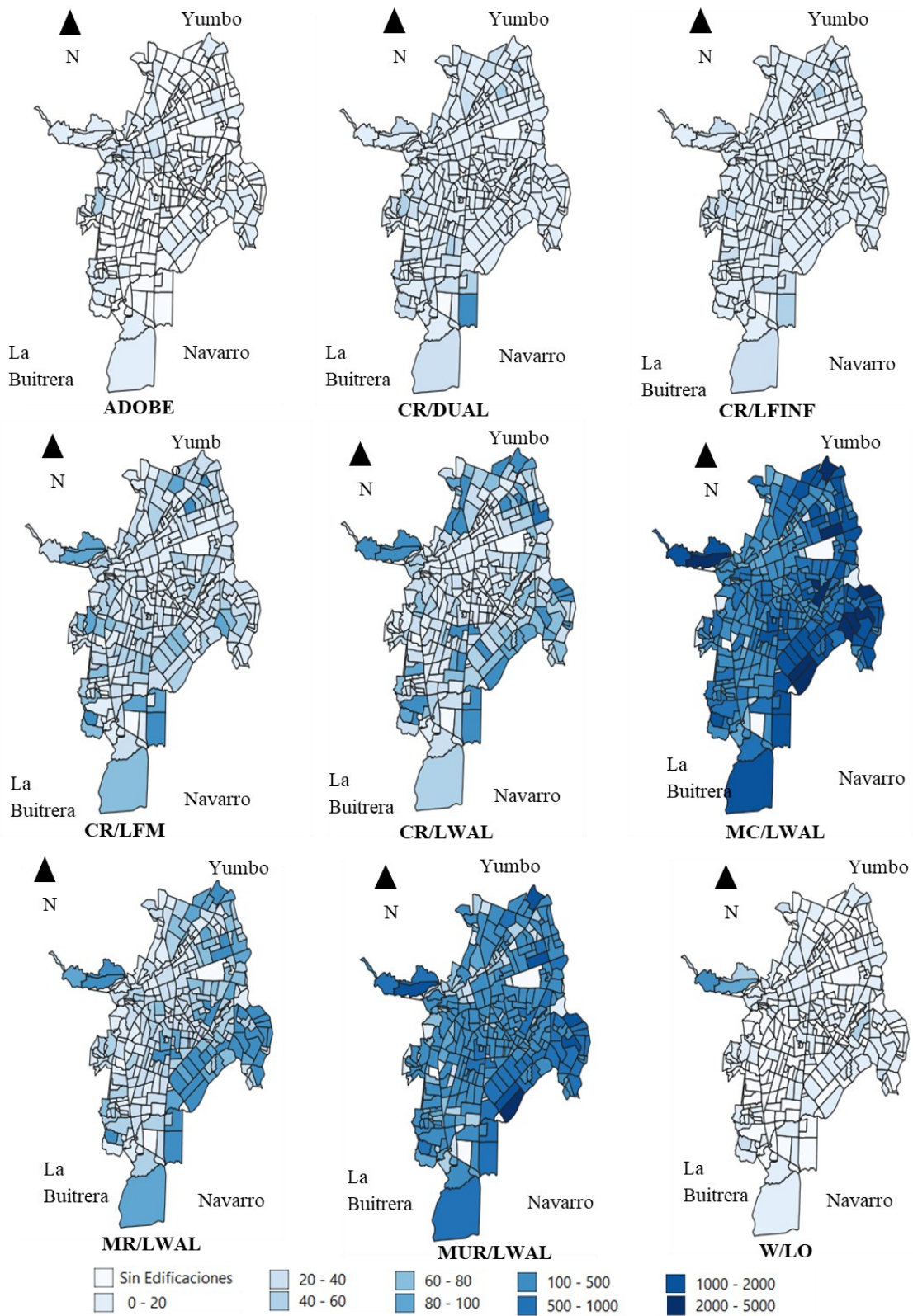


Fig 53. Distribución de la cantidad de edificaciones de cada sistema estructural por barrio.

En la Fig 54 se observa en porcentaje la distribución de cada una de las tipologías estructurales en relación con el total de la ciudad y la proporción correspondiente a la cantidad de personas que habita en cada sistema estructural.

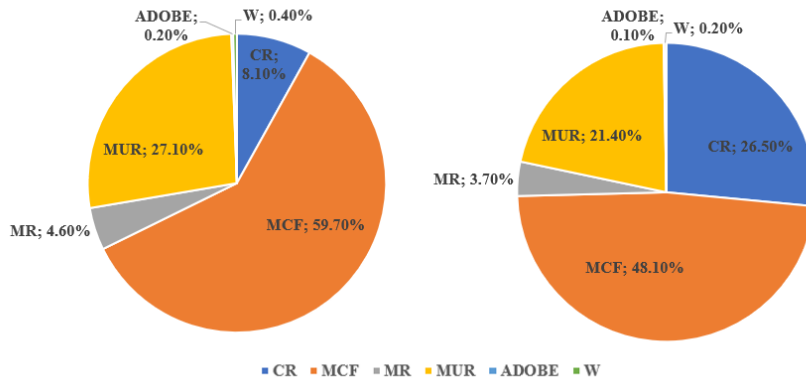


Fig 54. Porcentaje de edificaciones (izquierda) y cantidad de habitantes (derecha) para las tipologías estructurales de mampostería y la agrupación de tipologías de concreto incluidas en el modelo de exposición sísmica de viviendas urbanas de la ciudad de Santiago de Cali.

El componente de las personas que habitan cada una de las edificaciones queda ilustrado en la Fig 55, en la cual se muestra cómo se distribuye la población de acuerdo con la densidad poblacional en los distintos barrios de Santiago de Cali.

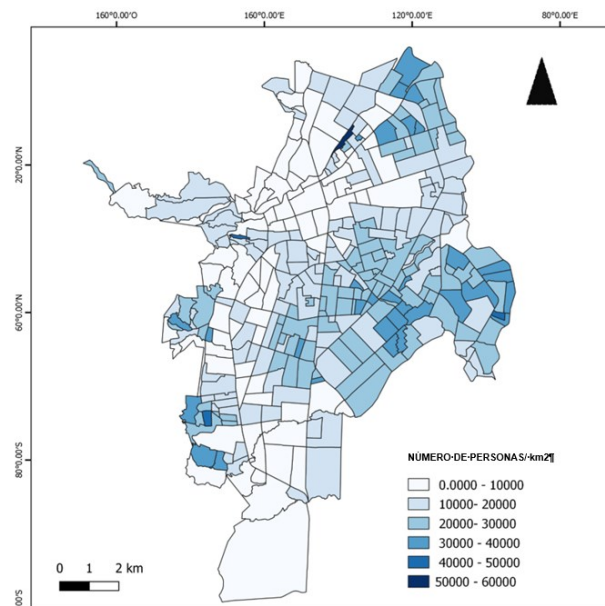


Fig 55. Densidad poblacional por km²

4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

Los resultados derivados del modelo de exposición de viviendas urbanas en Santiago de Cali se compararon con información procedente de fuentes adicionales, con el fin de identificar semejanzas y diferencias respecto a estudios anteriores.

En cuanto a la cantidad de edificaciones se puede observar en la

Tabla 25 que la cantidad de edificaciones de la presente investigación difiere en 6.8% con respecto a la investigación desarrollada por GEM en el proyecto TREQ (2021) [20], un 7.5% con respecto a la investigación del proyecto SARA (2016) y 10.9% respecto a la investigación de Acevedo [38]. Adicionalmente, la cantidad de edificaciones obtenidas en base a la información censal como se presenta en esta investigación puede presentar un aproximado en cantidad ya que está condicionada a la realización de las encuestas a las personas.

En aquellos barrios donde el censo registraba cero habitantes, se coincidía con la ausencia de construcciones destinadas a la vivienda. Esto implicaba que dichos barrios estaban destinados a otros usos, como institucionales o industriales. También se encontraron casos donde, a pesar de hallarse unidades habitacionales, el censo los consideraba deshabitados. Para abordar esta discrepancia, se llevaron a cabo visitas virtuales mediante Google Street View para inspeccionar visualmente las construcciones existentes. Los barrios donde se corroboró la presencia de viviendas fueron incluidos en el estudio como se observa en la Fig 56 presentada por el CENSO [73].

La cantidad de población inferida para Santiago de Cali en la presente investigación difiere 13.8% con respecto a la estimada por GEM en el proyecto TREQ (2021), un 14.8% con respecto a la investigación del proyecto SARA (2016) y 34.4% respecto a la investigación de Acevedo [38]. Estas variaciones, principalmente con el modelo de Acevedo [38] se deben a que dicho estudio implementó la proyección del censo general realizado en el año 2005, mientras que la presente investigación se desarrolló con el censo de población y vivienda de 2018.

La cantidad de población presentada en esta investigación difiere alrededor de 0.9% con respecto a la presentada por el censo de 2018 en la Tabla 26, ya que la presente investigación pudo incluir algunos habitantes aledaños a la cabecera municipal en las zonas de expansión de la ciudad.

Tabla 26. Resumen de cantidad de población, viviendas y edificaciones de investigaciones previas.

Modelo	TREQ 2021[20]	SARA_2016 [74]	Acevedo [38]	Modelo de la presente investigación
Población (miles)	2,045.1	2,063.3	2,416.5	1,797.5
Viviendas (miles)	-	501.6	764.0	698.2
Edificaciones (miles)	348.7	350.8	362.0	326.4

Tabla 27. Resumen de cantidad de población censada en el censo de población y vivienda 2018, [73].

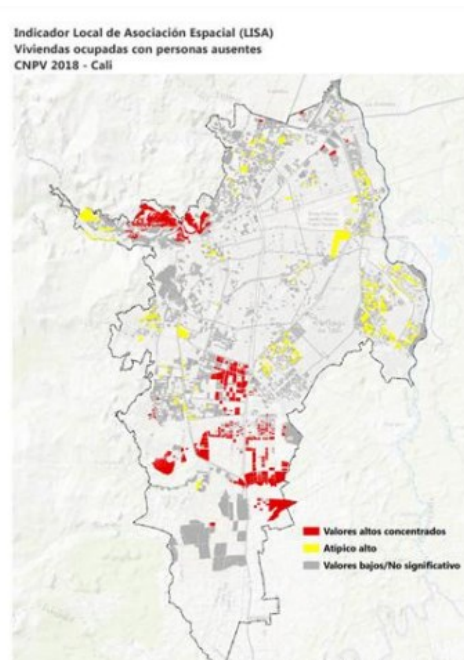


Fig 56. Viviendas ocupadas con personas ausentes [73].

Respecto a la distribución de las edificaciones según las macrotipologías estructurales (sin considerar ductilidad y número de pisos), la Fig 57 muestra una comparación de los resultados de la presente investigación con los modelos de exposición desarrollados en el Proyecto TREQ (2021) y el estudio de Acevedo [38], modelos a los que se tuvo acceso al realizar el presente trabajo.

Como se visualiza en la Fig 57, las macrotipologías de mampostería confinada (MCF) y mampostería no reforzada (MUR) son las más comunes en todos los modelos, representando la mayor parte de las edificaciones residenciales. En particular, los valores de MCF varían entre el 51.1% y el 62.9% en los demás modelos; para este estudio representan el 55.7%, lo cual muestra

una consistencia general en esta tipología. La mampostería no reforzada (MUR) también presenta valores relativamente similares, con porcentajes entre el 24.3% y el 38.8% en los diferentes modelos.

Sin embargo, se aprecian diferencias importantes en las macrotipologías de concreto reforzado (CR) y mampostería reforzada (MR). La Fig 57 muestra que el porcentaje de edificaciones de concreto reforzado en este estudio es del 10.9%, siendo un valor mayor que el reportado en los demás modelos, pero cercano al mayor valor de los modelos del proyecto TREQ (10.6% para el experto 1). Para la macrotipología CR se observa una diferencia importante entre los modelos del proyecto TREQ y el de esta investigación con respecto al modelo de Acevedo [38], el cual reporta el porcentaje más bajos de edificaciones de CR (3.9%). Con respecto a la macrotipología (MR) se observan diferencias importantes entre todos los modelos considerados, inclusive al interior de los modelos asociados al Proyecto TREQ. El valor estimado en el presente modelo (4.3%) es superior al reportado por los expertos del Proyecto TREQ (0.1% - 3-5%), e inferior al valor del 9.7% reportado por Acevedo [38].

Finalmente, la Fig 57 también muestra la presencia de edificaciones en adobe y madera (W) en todos los modelos, aunque en proporciones mucho menores que las demás macrotipologías, con valores que van del 0.1% al 1.5%. Esta baja presencia resalta que las estructuras residenciales en las áreas estudiadas se concentran en MCF y MUR, mientras que las otras tipologías son menos frecuentes.

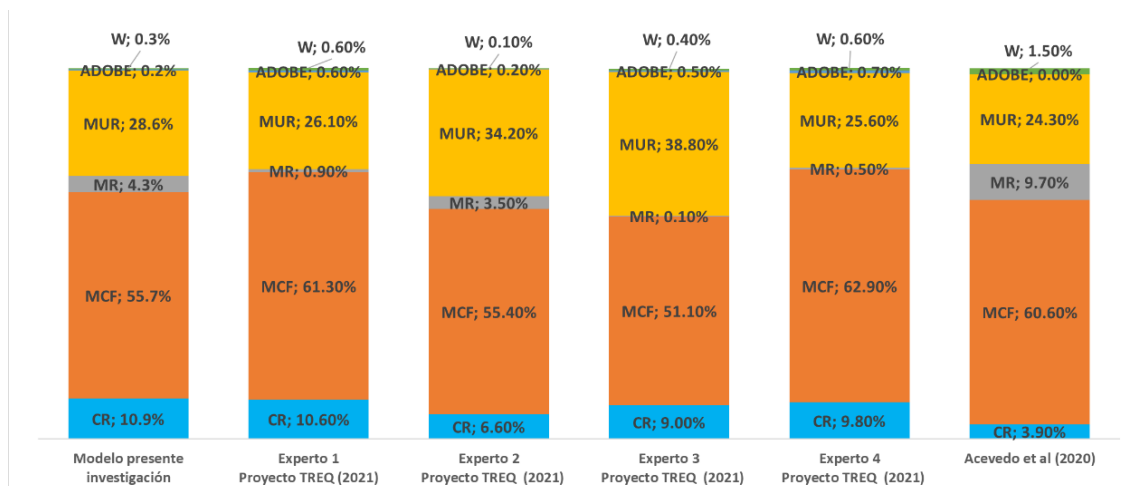


Fig 57. Comparación de distribución de tipologías estructurales en el presente estudio con modelos distribuciones de los modelos de TREQ (2021)[20] y Acevedo [38].

Para las edificaciones con sistema estructural de concreto reforzado, se resalta que esta macrotaxonomía se subdivide en cuatro tipos de edificaciones: pórticos resistentes a momento (CR/LFM), pórticos resistentes a momento con muros adosados (CR/LFINF), sistemas duales (CR/LDUAL) y muros de concreto (CR/LWAL). La Fig 58 compara la distribución de las tipologías de concreto reforzado al interior de cada modelo de exposición considerado, observando diferencias importantes: se observa, en primer lugar, que en los modelos de referencia los pórticos con muros adosados ocupan entre el 46% y el 90% de los edificios de concreto reforzado. Sin embargo, para el presente estudio, CR/LFINF solo representa el 7% de los edificios de CR. Otra diferencia importante se encuentra en la tipología CR/LWAL: en la presente investigación se asignó este sistema estructural directamente por el material de pared de concreto en las encuestas censales, por lo que la mayoría de las edificaciones de CR corresponden a muros de concreto reforzado (52.3%); en los modelos de referencia el porcentaje de edificaciones de CR correspondientes a CR/LWAL varía entre el 2% y el 19%. Se reconoce que la asignación de material de pared en las encuestas del censo depende de la habilidad y los conocimientos de los encuestadores; la diferencia en el número de edificaciones CR/LWAL entre los diferentes modelos puede ser un indicador de errores en la asignación de este material de pared en las encuestas realizadas. También se observa que la asignación del 31% de las edificaciones de CR a la tipología de pórticos de concreto (CR/LFM) solo coincide con el criterio del experto 2 del Proyecto TREQ (33%) y que, además, el modelo desarrollado en el presente trabajo asigna un mayor número de edificaciones de CR a la tipología de edificios duales (9.3% vs. 0% al 2%).

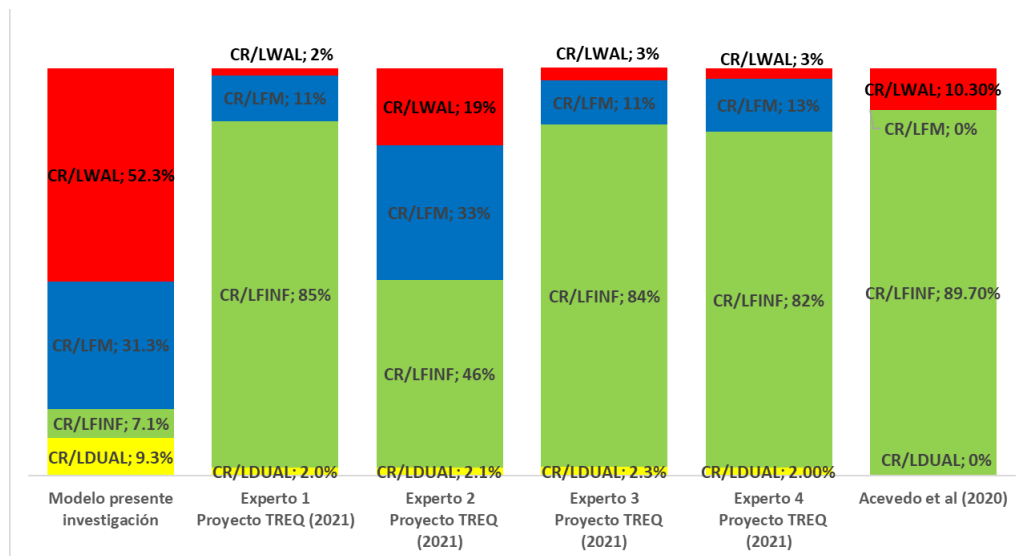


Fig 58. Comparación de distribución de tipologías estructurales de concreto de la presente investigación con modelos distribuciones de los modelos de TREQ (2021)[20] y Acevedo [38].

A continuación, se presentan comparaciones del modelo realizado en esta investigación con los dos modelos de referencia: Acevedo [38] y Proyecto TREQ (2021)[20].

Para la comparación con el modelo de Acevedo [38], se contrastan los porcentajes de edificaciones por tipología estructural y rango de altura (número de pisos), como se muestra en la Fig 59.

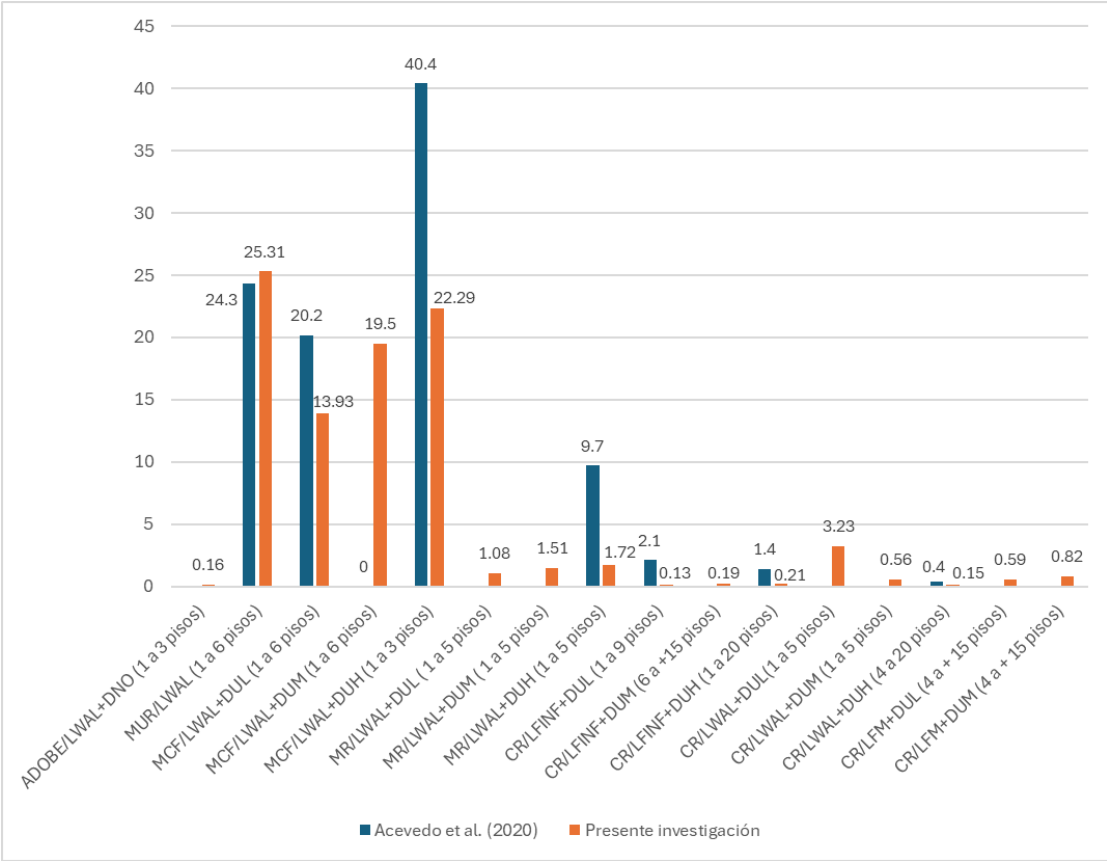


Fig 59. Comparación de distribución de tipologías estructurales con ductilidad y altura de la presente investigación con el modelo de Acevedo [38].

La comparación de la Fig 59 muestra porcentajes similares para las edificaciones de mampostería no reforzada (MUR/LWAL). En el caso de la mampostería confinada, aunque a nivel de macrotipologías los porcentajes son comparables (ver Fig 57), se presentan diferencias en la clasificación por ductilidad. La presente investigación emplea tres niveles de ductilidad para la macrotipología MCF (baja – DUL, media – DUM y alta – DUH), mientras que el modelo de Acevedo [38] considera dos niveles (baja – DUL y alta – DUH). Esta diferencia en la categorización refleja distintas metodologías para representar la variabilidad de la ductilidad en las edificaciones analizadas.

Se observa además que la presente investigación reporta un mayor porcentaje de edificaciones con sistemas estructural desconocido, del 6.63% vs. 1.5% del modelo de Acevedo [38]. Finalmente, se destaca que el modelo desarrollado en esta investigación incluye tipologías no contempladas en el modelo de Acevedo [38], como los pórticos de concretos resistentes a momento sin muros adosados (CR/LFM), lo que genera que el modelo de Acevedo [38] tenga una proporción mayor de edificaciones de pórticos de concreto con muros adosados. De manera complementaria, el modelo de Acevedo [38] clasifica los pórticos duales con ductilidad alta (DUH), bajo el criterio de que estos sistemas estructurales suelen ser diseñados con criterios de ingeniería y, en consecuencia, deberían cumplir con las especificaciones establecidas. En esta investigación, se incorporan tres niveles de ductilidad (DUL, DUM y DUH) para esta tipología, considerando que, en la práctica, pueden presentarse variaciones en la construcción o en la calidad de los diseños.

La presente investigación reporta niveles más bajos de mampostería con ductilidad baja y alta, debido a la inclusión de un 18.38% de edificaciones de 1 a 3 pisos clasificadas con ductilidad media. Esta categoría se incorporó considerando que, aunque las edificaciones de mampostería confinada están diseñadas para contar con elementos de confinamiento, en muchos casos este no es continuo o completo. Algunas estructuras pueden carecer de confinamiento en los vanos, o este puede no cumplir con las especificaciones constructivas establecidas. Además, en el confinamiento de cubiertas, es común que no se incluyan las viguetas inclinadas, lo que puede afectar el comportamiento estructural de las edificaciones en caso de carga sísmica. En este caso este tipo de edificaciones también podrían asumirse con ductilidad baja.

A su vez, los resultados similares en el MUR/LWAL (24.3% en Acevedo [38]. frente a 25.31% en la investigación actual) refuerzan la validez y fiabilidad de ambos estudios, indicando que, a pesar de las diferencias en el enfoque, hay consenso sobre la relevancia de esta tipología en el contexto de riesgo sísmico. Esto sugiere que las estructuras de esta categoría son altamente representativas y deben ser consideradas en la planificación y diseño de edificaciones en zonas sísmicamente activas. Finalmente, las diferencias en los resultados de UNK/LN/DNO (1.5% en Acevedo [38] frente a 6.64% en la presente investigación) pueden atribuirse a diferentes metodologías de recopilación de datos, lo que resalta la necesidad de un marco metodológico que permita una comparación más clara entre estudios. En resumen, este análisis revela la complejidad y la importancia de una categorización adecuada de las tipologías estructurales, enfatizando la necesidad de un enfoque más detallado y contextualizado para la evaluación del riesgo sísmico, lo

que no solo enriquece la comprensión del comportamiento estructural ante sismos, sino que también proporciona una base sólida para futuras investigaciones y prácticas en ingeniería sísmica.

Las Fig 60, Fig 61 y Fig 62 presentan una comparación detallada entre el modelo de exposición de esta investigación y la media de los modelos del Proyecto TREQ (2021)[20]. Esta comparación abarca no solo los sistemas estructurales, sino también las variaciones en altura y ductilidad: la altura se representa como Baja (1 a 3 pisos), Media (4 a 5 pisos), Media-alta (6 a 14 pisos) y Alta (mayor o igual a 15 pisos), la ductilidad se define en la descripción de la tipología estructural.

En la Fig 60 se presenta la totalidad de las tipologías estructurales analizadas tanto en la presente investigación como en el proyecto TREQ (2021)[20]. En esta gráfica se destaca que las tipologías con mayores porcentajes corresponden a estructuras de mampostería, mientras que se evidencian los bajos porcentajes asociados a las tipologías de concreto. Para mejorar la visualización de los datos, en la Fig 61 se detalla el comportamiento de las tipologías de mampostería con sus diferentes niveles de ductilidad y alturas, así como las tipologías de madera y aquellas con sistemas estructurales no definidos, permitiendo una mejor visualización de los datos. Por otro lado, en la Fig 62 se presenta un enfoque específico en las tipologías de concreto, lo que también facilita un análisis más claro y detallado.

En el caso de las edificaciones de concreto reforzado (CR), aunque los porcentajes de distribución entre este modelo y el del Proyecto TREQ son similares, existen diferencias notables en la clasificación por altura y ductilidad. Estas diferencias indican que el Proyecto TREQ, al apoyarse en información catastral más detallada y el juicio de expertos, logra capturar una mayor diversidad en edificaciones de baja altura y ductilidad baja. En contraste, la presente investigación, que se basa en datos censales y observaciones de campo, agrupa con mayor frecuencia estas edificaciones en alturas medias y ductilidad media, lo que podría tener implicaciones en la precisión de la estimación del riesgo en ciertas áreas.

En cuanto a la mampostería confinada (MCF), ambos modelos coinciden en señalar su predominancia en áreas urbanas. No obstante, el Proyecto TREQ asigna una proporción mayor a edificaciones de baja altura y ductilidad baja, mientras que el presente modelo distribuye una proporción de las edificaciones de mampostería confinada en ductilidades medias y altas, teniendo en cuenta que las ductilidades altas aplica para edificaciones de 1 y 2 pisos como lo establece la Norma sismorresistente colombiana NSR10 en el título E [18].

En el caso de la mampostería no reforzada (MUR), los modelos presentan una alta concordancia en los porcentajes generales, validando la representatividad de esta tipología en ambos estudios. Sin embargo, al analizar los niveles de altura, el Proyecto TREQ tiende a clasificar estas edificaciones en baja altura, mientras que el modelo de esta investigación las agrupa principalmente en alturas medias. Esta variación puede reflejar las distintas metodologías y criterios empleados para la clasificación.

Las tipologías de Adobe y Madera muestran una baja prevalencia en las áreas urbanas estudiadas, lo que confirma su limitada representatividad en el contexto de riesgo sísmico. No obstante, el Proyecto TREQ distribuye estas estructuras en una gama más amplia de alturas, mientras que el modelo actual las clasifica predominantemente como edificaciones de baja altura y baja ductilidad.

En conjunto, estos resultados destacan la importancia de utilizar fuentes y enfoques metodológicos diversos para construir modelos de exposición sísmica más precisos. Aunque el modelo basado en datos censales y observaciones de campo ofrece una base sólida en contextos donde la información catastral es limitada, la inclusión de datos más detallados permite obtener una visión más precisa y adaptable a los riesgos específicos de cada área. La metodología presentada en este trabajo no solo es valiosa para evaluar el riesgo sísmico a nivel nacional, incluso en regiones con datos estructurales limitados, sino que también proporciona la flexibilidad para ajustar parámetros de altura y ductilidad según las condiciones locales, convirtiéndose en una herramienta clave para la planificación urbana y la mitigación de riesgos.

A pesar de las diferencias observadas entre los modelos analizados, es fundamental subrayar que los datos obtenidos en esta investigación resultan sumamente valiosos, especialmente en contextos donde no se dispone de información catastral actualizada. El enfoque basado en datos censales y encuestas de campo ha demostrado ser una metodología eficaz en áreas con recursos limitados, proporcionando un modelo de exposición replicable y adaptable a distintas regiones del país. Estos resultados no solo permiten construir modelos de riesgo sísmico aplicables a nivel nacional, sino que también brindan una visión representativa de la exposición al riesgo sísmico, que puede ser ajustada conforme a las características locales. En este sentido, el modelo desarrollado se consolida como una herramienta útil para la planificación urbana y la toma de decisiones estratégicas en la mitigación de desastres naturales.

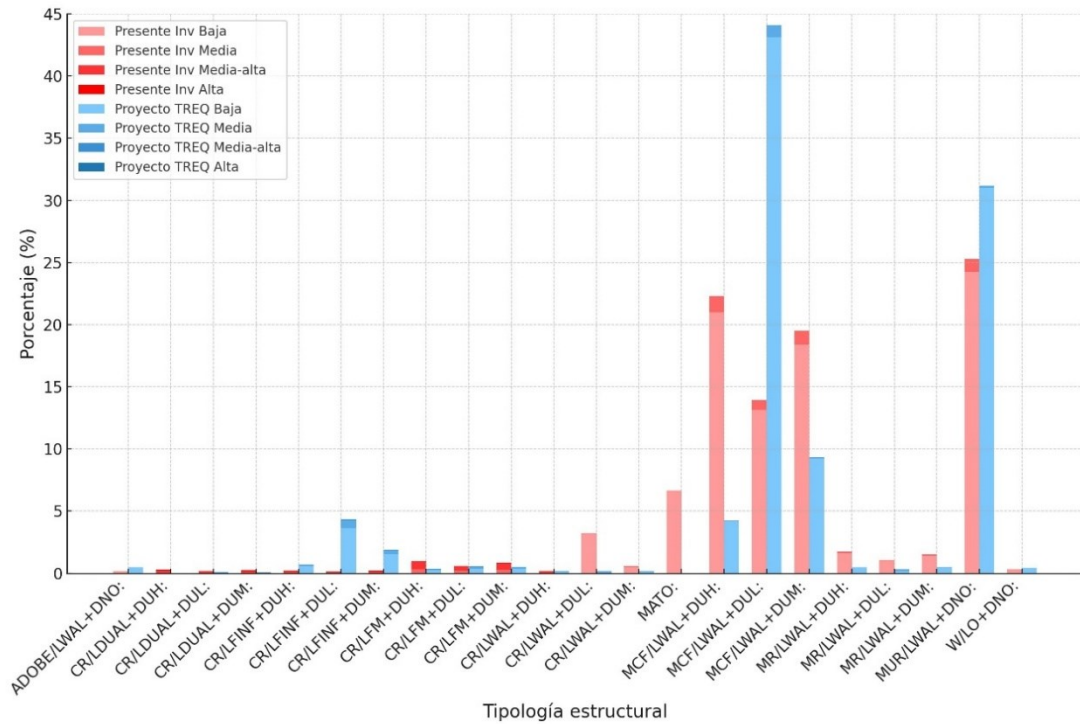


Fig 60. Comparación de distribución de tipologías estructurales con ductilidad y altura de la presente investigación con el modelo de TREQ (2021)[20].

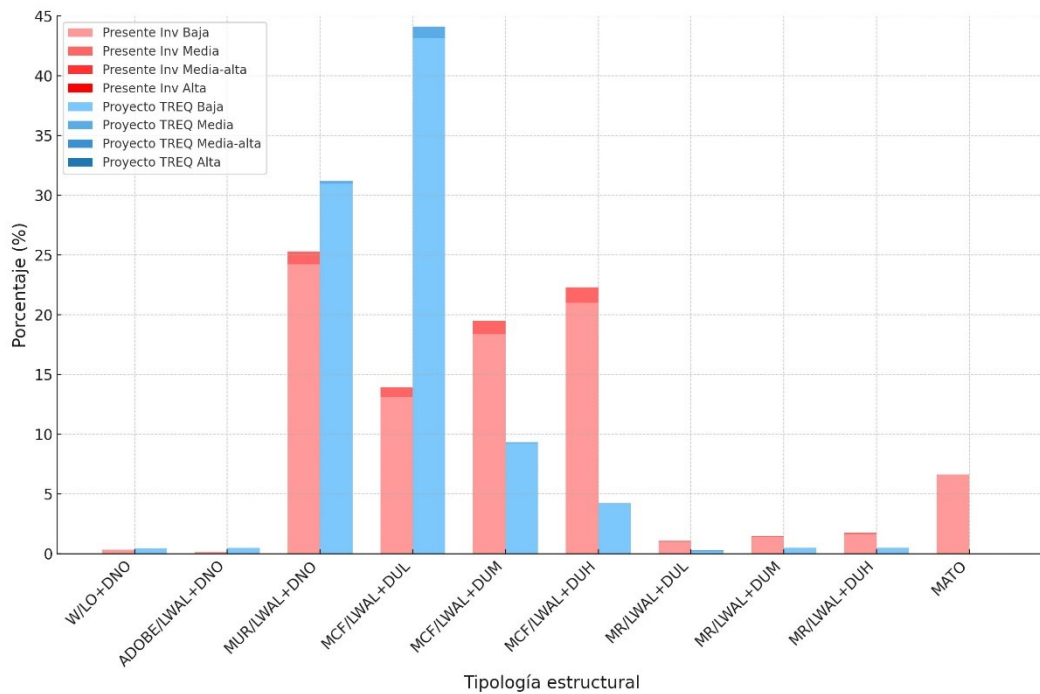


Fig 61. Comparación de distribución de tipologías estructurales con ductilidad y altura de las tipologías de mampostería, adobe y madera de la presente investigación con el modelo de TREQ (2021)[20].

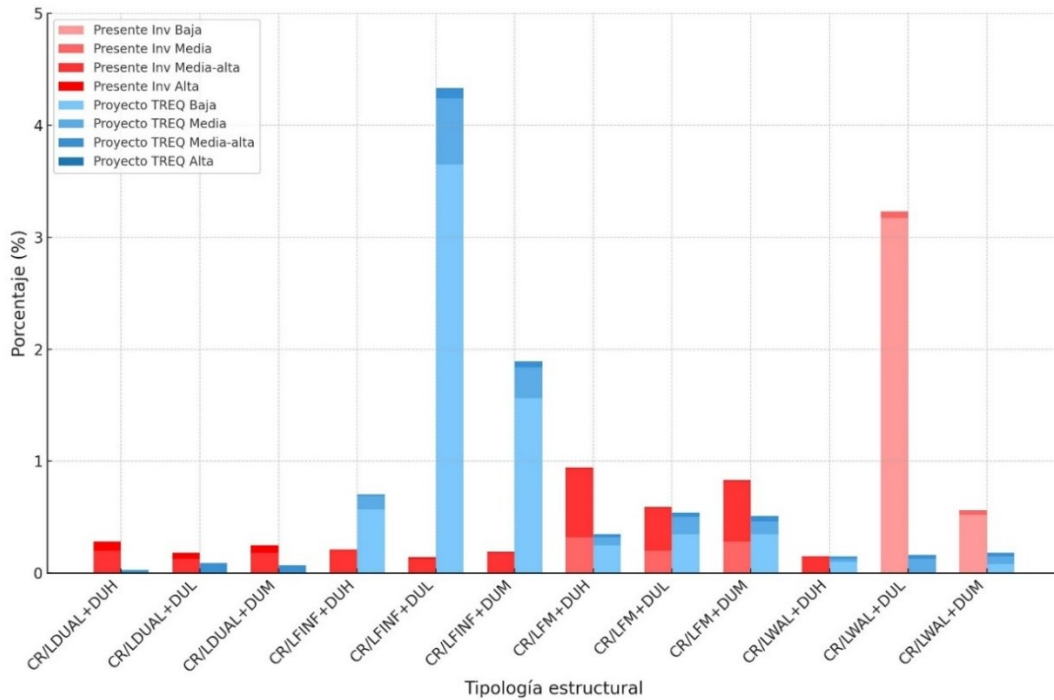


Fig 62. Comparación de distribución de tipologías estructurales con ductilidad y altura de las tipologías de concreto de la presente investigación con el modelo de TREQ (2021) [20].

La validación del modelo de exposición de viviendas residenciales de Santiago de Cali de la presente investigación ha demostrado su solidez y relevancia, especialmente al ser contrastado con otros modelos reconocidos como TREQ (2021)[20] y Acevedo [38]. Las diferencias observadas en la cantidad de edificaciones y la distribución de tipologías estructurales resaltan la importancia de adaptar los modelos a las realidades locales y a los datos disponibles más recientes.

Uno de los hallazgos clave es la consistencia en la identificación de las tipologías predominantes, como la mampostería confinada (MCF) y la mampostería no reforzada (MUR), lo que valida el enfoque metodológico adoptado. Sin embargo, las discrepancias en la clasificación y distribución de las tipologías de concreto reflejan la necesidad de mejorar la precisión en la recolección de datos, especialmente en lo que respecta a la definición de tipologías estructurales y los niveles de ductilidad.

Este proceso de validación ha permitido identificar tanto las fortalezas como las limitaciones del modelo propuesto, especialmente en su capacidad de adaptación a las características locales y su potencial de aplicación en otras regiones. La integración de datos censales, observaciones de campo y herramientas digitales como Google Street View ha facilitado la caracterización estructural en ausencia de información catastral detallada, permitiendo una mayor cobertura y precisión en la clasificación tipológica. Además, esta metodología ha evidenciado la importancia de combinar

múltiples fuentes de datos para mejorar la representatividad del modelo y reducir incertidumbres en la evaluación del entorno construido.

En conclusión, la validación del modelo no solo refuerza su aplicabilidad para la evaluación del riesgo sísmico en Santiago de Cali, sino que también aporta valiosas lecciones metodológicas para la construcción de modelos de exposición en contextos similares. Este trabajo contribuye de manera significativa al cuerpo de conocimiento en ingeniería sísmica y planificación urbana, proporcionando una herramienta crucial para la mitigación del riesgo y la resiliencia comunitaria.

5. CONCLUSIONES

La estimación del riesgo sísmico permite anticipar los posibles impactos que un evento telúrico podría generar en la población y en la infraestructura, considerando tres componentes fundamentales: la amenaza, entendida como la probabilidad de ocurrencia de un sismo en un lugar determinado; la exposición, que se refiere a los elementos que podrían resultar afectados; y la vulnerabilidad, asociada a la capacidad de las estructuras para resistir dichas sollicitaciones.

En este marco, los estudios orientados a caracterizar la exposición resultan esenciales para precisar el nivel de riesgo, aunque su desarrollo suele ser limitado y complejo, tal como se señaló a lo largo del documento. En este trabajo se implementó una metodología para la construcción de un modelo de exposición de edificaciones residenciales en Santiago de Cali, a partir de la información proveniente del Censo de Población y Vivienda 2018 del DANE. Este ejercicio buscó generar lineamientos que permitan replicar modelos similares en distintos municipios del país. Para fortalecer el modelo se incorporaron también encuestas y observaciones apoyadas en herramientas como Google Street View.

La metodología planteada incluyó varias fases: recopilación de datos censales, clasificación de edificaciones según tipología, altura, material predominante y estrato socioeconómico, así como validación de los resultados. El enfoque adoptado demostró ser sólido, ya que generó resultados coherentes con estudios más avanzados, alcanzando un nivel de similitud aceptable. Además, ofrece una herramienta estandarizada y flexible para su aplicación en la estimación del riesgo sísmico en diferentes regiones del país.

La exploración de la información del Censo de Población y Vivienda del DANE ha demostrado ser un recurso valioso para el desarrollo de modelos de exposición en la evaluación del riesgo sísmico. La metodología aplicada permite utilizar estos datos censales de manera efectiva, logrando una alta precisión en la clasificación de edificaciones y su distribución socioeconómica. Además, al evitar la dependencia de información catastral, que varía entre diferentes regiones, se obtiene un modelo más consistente y adaptable a diversas áreas. Sin embargo, se recomienda ampliar el alcance de los parámetros del modelo, incorporando detalles adicionales como el área construida por edificación para mejorar la estimación de los costos de reposición ante eventos sísmicos y así proporcionar una herramienta aún más robusta para la toma de decisiones por parte de las autoridades gubernamentales.

La clasificación de las edificaciones residenciales en Santiago de Cali, realizada según su sistema estructural, rango de altura, material de paredes y estrato socioeconómico, ha proporcionado una visión detallada de la estructura urbana de la ciudad. Las principales observaciones asociadas a esta clasificación se listan a continuación:

- El sistema estructural predominante en la ciudad de Cali es la mampostería confinada, que representa el 59.7% de las edificaciones, y en la que reside el 48.1% de la población urbana. Esta situación es favorable, ya que la mampostería confinada ofrece una mayor resistencia sísmica y reduce la probabilidad de colapso total en comparación con las edificaciones de mampostería no reforzada, que constituyen el 27.1% de las edificaciones y albergan al 21.4% de la población.
- Los mapas de distribución de edificaciones revelan que tanto las edificaciones de mampostería no reforzada (MUR) como las de mampostería confinada (MC) están distribuidas de manera uniforme a lo largo del casco urbano, sin relación directa con la sectorización por estrato socioeconómico. Por otro lado, las edificaciones de madera (W) se concentran principalmente en el sector noroccidental, en barrios como Vista Hermosa, Terrón Colorado y Aguacatal, que corresponden a los estratos 1 y 2.
- Las edificaciones de adobe, aunque están distribuidas por todo el casco urbano, presentan una baja densidad en cada barrio, con entre 0 y 20 edificaciones por barrio. Los mapas también muestran que la mayor densidad poblacional se encuentra en la zona norte y centro oriental del casco urbano, en barrios de estratos 1 y 2.

La evaluación de la precisión y calidad del modelo de exposición desarrollado con datos censales reveló resultados prometedores en cuanto a su fiabilidad y exactitud. Comparando los resultados con estudios previos como los de GEM en el proyecto TREQ (2021), el proyecto SARA (2016) y Acevedo [38], se observan diferencias en la cantidad de edificaciones y población, con variaciones del 6.8% respecto a TREQ, 7.5% con SARA y 10.9% con Acevedo [38] en cuanto a edificaciones, y del 13.8%, 14.8% y 34.4% en población, respectivamente. Estas discrepancias son atribuibles a la actualización del censo de 2018 y a las diferentes metodologías usadas para el desarrollo de los modelos.

En cuanto a las tipologías estructurales y sus distribuciones por altura, se han observado diferencias significativas en los porcentajes de edificaciones, como en la tipología CR/LFINF+DUL (1 a 9 pisos), que representa un 2.1% en el estudio de Acevedo [38], un 4.3% en el proyecto TREQ (2021) y un 0.13% en la investigación actual, y la tipología MCF/LWAL DUL (1 a 6 pisos) con un 20.2%

en Acevedo [38], un 44.1% en el proyecto TREQ (2021) y un 13.93% en esta investigación, aunque se incluye un 18.38% adicional en edificaciones de 1 a 3 pisos con ductilidad media. La tipología MUR/LWAL (1 a 6 pisos) muestra una consistencia significativa con un 24.3% en Acevedo [38], 31.18% para el proyecto TREQ (2021) y un 25.31% en esta investigación, mientras que la tipología MCF/LWAL+DUH (1 a 2 pisos) presenta una discrepancia entre el 40.4% reportado por Acevedo [38], 4.18% para el proyecto TREQ (2021) y el 21.01% en la investigación actual, debido a un análisis más detallado de niveles de ductilidad. La tipología UNK/LN/DNO (1 a 2 pisos) también muestra una diferencia notable con un 1.5% en Acevedo [38] y un 6.64% en la presente investigación.

Un hallazgo relevante de esta investigación se encuentra en la tipología CR/LWAL, cuya asignación se realizó directamente con base en el material de pared de concreto reportado en las encuestas censales. Esto resultó en que el 52.3% de las edificaciones clasificadas como CR correspondieran a muros de concreto reforzado, en contraste con los modelos de referencia, donde este porcentaje varía entre el 2% y el 19%. Este resultado pone de manifiesto la influencia de la experiencia y conocimientos de los encuestadores en la precisión de la información recolectada, y sugiere que las diferencias observadas podrían reflejar inconsistencias en la asignación de este material de pared.

Asimismo, el modelo desarrollado asigna el 31% de las edificaciones de CR a la tipología de pórticos de concreto (CR/LFM), cifra similar al criterio de uno de los expertos del Proyecto TREQ (33%). Además, clasifica un 9.3% de las edificaciones de CR como edificios duales (CR/LDUAL), dentro de un rango más amplio en comparación con modelos previos, que estimaban entre 0% y 2%. Estos resultados sugieren que la metodología empleada permite capturar una diversidad tipológica adicional y ofrece una representación complementaria de las condiciones estructurales locales, aportando una perspectiva igualmente válida a las exploradas en otras investigaciones.

La comparación entre los resultados de la presente investigación y el modelo de Acevedo [38] aporta información valiosa sobre la representación de las tipologías estructurales en estudios de riesgo sísmico. El modelo de Acevedo [38] constituye una referencia clave en la caracterización estructural del país, al proponer una clasificación detallada de las edificaciones según su ductilidad y sistema resistente. En la presente investigación se retoma dicha clasificación, pero se amplía su aplicación al considerar un rango más diverso de variaciones en la ductilidad estructural, reconociendo que, aunque muchas edificaciones son diseñadas por ingenieros, en la práctica

pueden presentarse diferencias en la construcción o en los diseños. Estos hallazgos refuerzan la importancia de la ductilidad, no solo en la respuesta sísmica de las estructuras, sino también en su identificación y representación dentro de los estudios de riesgo.

Por otro lado, los resultados similares en el MUR/LWAL (24.3% en Acevedo y 31.9% de TREQ (2021) frente a 25.31% en la investigación actual) refuerzan la validez y fiabilidad de los tres estudios, indicando que, a pesar de las diferencias en el enfoque metodológico, hay un consenso sobre la relevancia de esta tipología en el contexto del riesgo sísmico. Este hallazgo sugiere que las estructuras de mampostería no reforzada son altamente representativas y deben ser consideradas prioritariamente en la planificación y diseño de edificaciones en zonas sísmicamente activas.

Asimismo, las diferencias en los resultados para las edificaciones con sistemas estructurales desconocidos (UNK/LN/DNO) —1.5% en Acevedo., 0% en TREQ (2021) frente a 6.64% en la presente investigación— pueden atribuirse a diferentes metodologías de recopilación de datos. Esto destaca la necesidad de establecer un marco metodológico común que facilite una comparación más clara y uniforme entre estudios.

A pesar de estas diferencias con los otros modelos desarrollados, los datos de la presente investigación son válidos y útiles. La comparación de tipologías estructurales muestra similitudes destacables, como la representación del 25.31% de edificaciones de mampostería no reforzada (MUR) en la investigación actual, frente al 24.3% reportado por Acevedo [38]. Por otro lado, el sistema de mampostería confinada (MCF) tiene una representación del 55.72% en esta investigación, comparado con el 60.6% en el estudio de Acevedo [38]. La discrepancia en sistemas estructurales menos representativos, como el concreto reforzado (CR), que representa un 10.9% en esta investigación frente a un rango de 6.6% a 10.6% en los modelos de TREQ, refleja la importancia de considerar variaciones metodológicas en la categorización de estos sistemas. En general, el modelo basado en el Censo de Población y Vivienda del DANE ha demostrado ser un modelo valioso para la evaluación del riesgo sísmico, proporcionando resultados consistentes y de alta calidad, y reforzando la validez de los datos presentados para la planificación y mitigación de riesgos sísmicos.

A pesar de las diferencias identificadas entre los modelos analizados, es importante destacar que los resultados de esta investigación son altamente valiosos, especialmente en contextos donde la información catastral actualizada es limitada o inexistente. La metodología empleada, basada en datos censales y encuestas de campo, ha demostrado ser una herramienta eficaz y práctica en áreas

con recursos limitados, permitiendo la construcción de un modelo de exposición replicable y adaptable a diversas regiones del país.

Estos hallazgos no solo facilitan el desarrollo de modelos de riesgo sísmico aplicables a nivel nacional, sino que también ofrecen una representación fiel de la exposición al riesgo sísmico, con la flexibilidad de ser ajustados según las características locales específicas. De este modo, el modelo propuesto se posiciona como una herramienta estratégica para apoyar la planificación urbana y la toma de decisiones informadas, orientadas a la reducción del riesgo sísmico y la mitigación de desastres naturales.

Para trabajos futuros, se recomienda ampliar las variables incluidas en el modelo de exposición sísmica para incluir el área construida, el costo de reposición y el costo comercial, con el fin de mejorar la precisión en la evaluación del riesgo sísmico y proporcionar datos más completos para la planificación y mitigación de riesgos en diferentes estratos socioeconómicos. Es importante considerar aspectos adicionales como la calidad de los materiales, el estado de mantenimiento y la antigüedad de las construcciones al asignar niveles de ductilidad. Asimismo, se debe establecer un sistema para la actualización periódica del modelo, incorporando nuevos datos censales, cambios en el uso del suelo y en las características de las edificaciones, así como avances en la normativa sísmica. Finalmente, es importante asegurarse que los resultados del modelo sean comunicados de manera clara y accesible a los tomadores de decisiones y al público general, proporcionando recomendaciones prácticas para la reducción del riesgo sísmico y la planificación de emergencias.

REFERENCIAS

- [1] The Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR), «Open Data for Resilience Initiative: Field Guide», Washington, DC, USA, 2014. Accedido: 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/opendri_fg_web_20140629b_0.pdf
- [2] United States Geological Survey (USGS), «Science for a changing world». Accedido: 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/?extent=-88.00316,-176.48438&extent=88.02751,678.51563&range=search&baseLayer=terrain&search=%7B%22name%22:%22Search%20Results%22,%22params%22:%7B%22starttime%22:%222023-06-3%2000:00:00%22,%22endtime%22:%222024->
- [3] Servicio Geológico Colombiano (SGC) y Global Earthquake Model (GEM), «Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia», 2018, *Bogotá, Colombia*.
- [4] Servicio Geológico Colombiano (SGC), «Sistema de Consulta de la Amenaza Sísmica de Colombia». [En línea]. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDelInvestigacion/geoamenazas/Paginas/Sistema-de-Consulta-de-la-Amenaza-Sismica-de-Colombia.aspx>.
- [5] M. Arcila *et al.*, «Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia», Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano and Fundación GEM, jul. 2020. doi: 10.32685/9789585279469.
- [6] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), «Estudio general de amenaza sísmica de Colombia», Bogotá, Colombia: Comité AIS-300, 2009.
- [7] Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), «Terremoto del Quindío», Quindío, ene. 1999. Accedido: 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sish.sgc.gov.co/visor/sesionServlet?metodo=irAlInfoDetallada&idSismo=62>
- [8] D. Barbosa, M. Sarabia, y M. Arcila, «El gran Sismo y Tsunami del 31 de enero de 1906 en el Pacífico Colombiano», 2019.
- [9] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 9 de julio de 1766, Buga (Valle del Cauca)», *Bogotá*, 2009.
- [10] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 5 de noviembre de 1884», 2009.
- [11] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 25 de mayo de 1885», Bogotá, Colombia, 2009.
- [12] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 31 de enero de 1906, en el Océano pacífico».
- [13] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 7 de junio de 1925, Cali (Valle del Cauca)», Bogotá, Colombia, 2010.

- [14] E. de J. Salcedo Hurtado, M. D. R. V. de J., y M. A. Vallejo Chocué, «Contribución al análisis macrosísmico del terremoto Del 7 De junio De 1925:principales efectos en la ciudad de Cali», *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, vol. 31, n.o 120, pp. 379-394, 2007.
- [15] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 4 de febrero de 1938, Eje cafetero», Bogotá, Colombia, 2007.
- [16] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 23 de mayo de 1957, Buenaventura (Valle del Cauca)», Bogotá, Colombia, 2009.
- [17] H. Pardo, H. Cifuentes, y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 20 de diciembre de 1961, Sonsón (Antioquia)», Bogotá, Colombia, 2009.
- [18] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, *Estudio macrosísmico del sismo del 20 de diciembre de 1961, Sonsón (Antioquia)*. Bogotá.
- [19] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Revisión de información histórica y reevaluación de intensidades del sismo del 9 de febrero de 1967», 2009, *Huila, Colombia*.
- [20] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 23 de noviembre de 1979 en el Eje Cafetero», *Bogotá*, 2007.
- [21] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 18 de octubre de 1992, Murindó (Antioquia)», *Bogotá, Colombia*.
- [22] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 6 de junio de 1994, Páez (Cauca)», Bogotá, Colombia, 2009.
- [23] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 8 de febrero de 1995, Calima (Valle del Cauca)», Bogotá, Colombia, 2010.
- [24] H. Cifuentes y A. M. Sarabia, «Estudio macrosísmico del sismo del 15 de noviembre de 2004 Pizarro (Chocó)», Bogotá, Colombia, 2010.
- [25] Vanguardia, «Temblor dejó ocho heridos y 143 casas averiadas en Cali», vol. 10, 10 de febrero de 2013. Accedido: 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/colombia/2013/02/10/temblor-dejo-ocho-heridos-y-143-casas-averiadas-en-cali/>
- [26] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), «Sitio oficial de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS)», Bogotá, Colombia, 2009. [En línea]. Disponible en: https://asosismica.org.co/?page_id=396.
- [27] L. E. García, «Desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición», *Rev. Ing., Univ. de los Andes*, vol. 41, pp. 71-77, 2014. doi: 10.16924/riua.v0i41.785.
- [28] «Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10».
- [29] Global Earthquake Model (GEM), «TREQ Project», Global Earthquake Model (GEM). Accedido: 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.globalquakemodel.org/proj/treq-es>

- [30] C. Yepes-Estrada, A. B. Acevedo, H. Pérez, N. García, A. Prieto, y A. Calderón, «Understanding seismic risk in Santiago de Cali (Colombia) for its application in risk management», *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 123, jun. 2025, doi: 10.1016/j.ijdr.2025.105485.
- [31] H. S. Maria, M. A. Hube, F. Rivera, C. Y. Estrada, y J. A. Valcárcel, «Development of national and local exposure models of residential structures in Chile», *Nat Hazards*, vol. 84, n.o 2, pp. 1-20, 2016, doi: 10.1007/s11069-016-2518-3.
- [32] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), «Sitio oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi». [En línea]. Disponible en: <https://www.igac.gov.co/>.
- [33] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), «Censo de población y vivienda 2018», 2018, *Bogotá, Colombia*.
- [34] Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), «Sistema de Información Sísmica», «IDIGER». [En línea]. Disponible en: <https://www.idiger.gov.co/rsismico>.
- [35] V. Silva *et al.*, «Development of a global seismic risk model», *Earthquake Spectra*, vol. 36, n.o 1, pp. S427-S445, 2020, doi: 10.1177/8755293019899953.
- [36] Global Earthquake Model (GEM), «global-seismic-risk-map». Accedido: 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.globalquakemodel.org/product/global-seismic-risk-map>
- [37] Banco Interamericano de Desarrollo (BID), D. R. División de Medio Ambiente, y Gestión del Riesgo de Desastres (INE/RND), «Indicadores de riesgo de desastre y de gestión de riesgos. Programa para América Latina y el Caribe», Washington, DC, USA: BID, 2010. Accedido: 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=35102108>
- [38] Global Earthquake Model (GEM), «The Hazard Component of the SARA Project». Accedido: 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sara.openquake.org/hazard>
- [39] J. García, G. Weatherill, M. Pagani, L. Rodríguez, V. Poggi, y the SARA Hazard Working Group, «Building and open seismic hazard model for South America: The SARA-PSHA model», en *de 16th world conference on earthquake engineering (16WCEE)*, Santiago, Chile: Paper 2145, ene. 2017.
- [40] Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), «Microzonificación y evaluación del riesgo sísmico del valle de Aburrá», Medellín, Colombia, 2007.
- [41] Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles (CIMOC) and Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos (CEDERI), «Microzonificación sísmica de la ciudad de Manizales», Bogotá, Colombia, 2002.
- [42] Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), Sociedad Colombiana de Geotecnia, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, y Universidad de los Andes, «Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sísmo resistente de edificaciones», Bogotá, Colombia, 2010.

- [43] Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) y Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), «Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali», en *Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA, Bogotá, Colombia: INGEOMINAS, 2005.*
- [44] M. Salgado-Gálvez, D. Zuluaga-Romero, y O. Cardona, «Evaluación probabilista del riesgo sísmico de Bogotá y Manizales con y sin influencia de la Caldas Tear», *Rev. Ing.*, vol. 38, n.o 1, pp. 6-13, 2013.
- [45] M. Salgado-Gálvez, D. Zuluaga-Romero, G. Bernal, M. Mora, y O. Cardona, «Fully probabilistic seismic risk assesment considering local site effects for the portfolio of building in Medellín, Colombia», *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 12, n.o 2, pp. 671-695, 2014, doi: 10.1007/s10518-013-9550-4.
- [46] A. B. Acevedo, J. D. Jaramillo, C. Yepes, V. Silva, F. A. O. Vergara, y M. Villar, «Evaluation of the seismic risk of the unreinforced masonry building stock in Antioquia, Colombia», *Nat. Hazards*, vol. 86, n.o 1, pp. 1-24, 2017.
- [47] A. B. Acevedo, J. D. Jaramillo, C. Yepes, y V. Silva, «Seismic damage scenarios for unreinforced masonry structures of Bogotá, Medellín and Cali (Colombia)», en *16th World Conf. on Earthquake Engineering (16WCEE)*, Santiago, Chile: Paper 905, 2017.
- [48] A. B. Acevedo *et al.*, «Seismic risk assessment for the residential buildings of the major three cities in Colombia: Bogotá, Medellín, and Cali», *Earthquake Spectra*, vol. 36, n.o S1, pp. 298-320, feb. 2020, doi: 10.1177/8755293020919425.
- [49] A. Acevedo *et al.*, «National Seismic Risk Model of Colombia Special Collection», *Earthquake Spectra*, 2025, Accedido: 18 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://journals.sagepub.com/topic/collections-eqs/eqs-1-national_seismic_risk_model_of_colombia/eqs
- [50] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), «Making development sustainable: The Future of Disaster Risk Management», Geneva, Switzerland: UNISDR, 2015.
- [51] Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), «Atlas de Riesgo de Colombia: Revelando los desastres latentes», Bogotá, Colombia: UNGRD, 2018.
- [52] J. Bommer y D. Boore, «Engineering Geology: Seismology, in *Encyclopaedia of Geology*». Elsevier Ltd, UK: Elsevier, pp. 1-13, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0123693969900200?via%3Dihub>.
- [53] Servicio Geológico Colombiano (SGC), «Zonificación por velocidad de onda de corte a 30 m (Vs30) en la ciudad de San Juan de Pasto», Bogotá, Colombia: SGC, 2015.
- [54] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), «estratificación socioeconomica». Accedido: 2 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/servicios-informacion/estratificacion-socioeconomica>
- [55] K. A. Porter, K. S. Jaiswal, D. J. Wald, M. Greene, y C. Comartin, «WHE-PAGER Project: A New initiative in estimating global building inventory and its seismic vulnerability», en *14th World Conf. on Earthquake Engineering (14WCEE)*, Beijing, China, oct. 2008.

- [56] A. Bono y M. G. Mora, «A global exposure model for disaster risk assessment», *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 10, pp. 442-451, dic. 2014, doi: 10.1016/j.ijdr.2014.08.009.
- [57] Earthquake Engineering Research Institute (EERI) and International Association for Earthquake Engineering (IAEE), «World Housing Encyclopedia». Accedido: 13 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.world-housing.net/>.
- [58] D. D'Ayala, «WHE-PAGER Project», en *de EERI WHE-PAGER Workshop*, Oakland, CA, USA, 2009.
- [59] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), «Informe de Sostenibilidad 2020», Bogotá, Colombia: DANE, 2021.
- [60] Y. Díaz, «La estadística en Colombia, una evolución fundamental para la toma de decisiones», *Magazín Iberoamericano de la Gestión Estadística*, vol. 6, pp. 14-23.
- [61] United Nations (UN), «Principles and recommendations for population and housing censuses», 2015, *Geneva, Switzerland: UN*.
- [62] United Nations (UN), «Recommendations for the 2020 censuses of population and housing», 2015, *Geneva, Switzerland: UN*.
- [63] F. Cacace, G. Zuccaro, D. Gregorio, y F. L. Perelli, «Building Inventory at National scale by evaluation of seismic vulnerability classes distribution based on Census data analysis: BINC procedure», *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 28, pp. 384-393, jun. 2018, doi: 10.1016/j.ijdr.2018.03.017.
- [64] C. Yepes *et al.*, «Report on the SARA Exposure and Vulnerability Workshop in Medellin, Colombia», 2014. Accedido: 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://sara.openquake.org/_media/risk:03_2014_-_workshop_medellin_-_exposure.pdf
- [65] H. Stone, «Exposure and vulnerability for seismic risk evaluations», en *UCL (University College London)*, jul. 2018.
- [66] M. Pittore y M. Wieland, «Toward a rapid probabilistic seismic vulnerability assesment using satellite and ground- based remote sensing», *Nat. Hazards*, vol. 68, n.o 1, pp. 115-145, 2013, doi: 10.1007/s11069-012-0475-z.
- [67] K. Porter, Z. Hu, C. Huyck, y J. Bevington, *User guide: Field sampling strategies for estimating building inventories*. Pavia, Italy: GEM Foundation: GEM, 2014.
- [68] U. Albayrak, M. Canbaz, y G. Albayrak, «A rapid seismic risk assessment method for existing building stock in urban areas», *Procedia Eng*, vol. 118, pp. 1242-1249, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.476>.
- [69] D. González, «Modelo de exposicion sismica de viviendas de Medellín», Master's thesis, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2017.
- [70] A. B. Acevedo, J. D. Jaramillo, C. Yepes, y F. A. Osorio, «Evaluation of the seismic risk of the unreinforced masonry building stock in Antioquia, Colombia», *Nat. Hazards*, vol. 86, n.o 1, pp. 31-54, 2016, doi: 10.1007/s11069-016-2647-8.

- [71] Departamento Administrativo Municipal de Santiago de Cali and Corporación OSSO, «Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo por Sismos en la Zona Urbana del Municipio Santiago de Cali, Primera Etapa», 2017, *Santiago de Cali, Colombia: OSSO*.
- [72] C. I. Ambiental, «Segunda etapa de la evaluación de la vulnerabilidad por sismos en la zona urbana del municipio de Santiago de Cali, para las edificaciones de ocupación normal (grupo de uso i del reglamento)», *Bogotá, Colombia*, 2019.
- [73] L. Martins y V. Silva, «Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses», *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 19, pp. 6719-6745, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00885-1>.
- [74] Federal Emergency Management Agency (FEMA), «HAZUS-MH MR5: Technical manual», 2014, *Washington, DC, USA: FEMA*.
- [75] P. Mouroux y B. Brun, «Presentation of RISK-UE project», *Bull Earthq Eng*, vol. 4, n.o 4, pp. 323-339, 2006, doi: 10.1007/s10518-006-9020-3.
- [76] H. Crowley, B. Polidoro, R. Pinho, y J. Van Elk, «Framework for developing fragility and consequence models for local personal risk», *Earthquake Spectra*, vol. 33, n.o 4, pp. 1325-1345, nov. 2017, doi: 10.1193/083116eqs140m.
- [77] M. Villar-Vega *et al.*, «Development of a fragility model for the residential building stock in South America», *Earthquake Spectra*, vol. 33, n.o 2, pp. 581-604, may 2017, doi: 10.1193/010716eqs005m.
- [78] United Nations Economic and Social Council (ECOSOC), «Resolution: Creation of the Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (GGIM)», 2012, *UN ECOSOC, New York, USA*.
- [79] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), «Manual de uso del marco geoestadístico nacional en el proceso estadístico», 2018, *Bogotá, Colombia: DANE*.
- [80] S. Brzev *et al.*, «GEM building taxonomy version 2.0», Pavia, Italy: GEM Foundation, Technical Report 2013-02 V1.0.0, 2013.
- [81] Federal Emergency Management Agency (FEMA), «Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: supporting», en *de Report No. FEMA 155*, 2nd ed., Washington, DC, USA: FEMA, 2002.
- [82] Global Earthquake Model (GEM), «OpenQuake Taxonomy Tool». Accedido: 30 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://taxonomy.openquake.org/terms/infilled-frame-lfinf>.
- [83] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), «Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018», 2019, *Cali, Valle del Cauca*. Accedido: 13 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/190711-CNPV-presentacion-valle.pdf>
- [84] C. Yepes-Estrada *et al.*, «Modelling the Residential Building inventory in South America for Seismic Risk Assessment», *Earthquake Spectra*, vol. 33, n.o 1, pp. 299-322, 2017, doi: 10.1193/101915EQS155DP.

ANEXOS

Anexo A. Distribución de tipologías estructurales según estrato y cantidad de pisos según las encuestas de la Etapa I y Etapa II. – Parte 1

ESTRATO	HEIGHT	ADO/E	CR				MATO	MCF	MR	MUR	W
			LWAL	LDUAL	LFINF	LFM	LWAL	LO	LWAL	LWAL	LWAL
1	1	0.0%	0.0%	5.6%	0.0%	0.0%	0.0%	51.1%	0.0%	41.1%	1.1%
1	2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	86.7%	0.0%	13.3%	0.0%
1	3	0.0%	0.0%	7.5%	0.0%	0.0%	0.0%	82.5%	0.0%	10.0%	0.0%
1	4	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
1	5	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	1	0.6%	0.0%	9.4%	0.3%	0.0%	0.3%	49.7%	0.3%	35.9%	0.3%
2	2	0.6%	0.0%	6.9%	1.0%	0.0%	0.0%	67.2%	0.0%	24.3%	0.0%
2	3	0.0%	0.0%	5.8%	0.0%	0.0%	0.0%	81.5%	0.4%	12.3%	0.0%
2	4	0.0%	0.0%	12.0%	2.0%	0.0%	0.0%	74.0%	0.0%	12.0%	0.0%
2	5	0.0%	0.0%	70.0%	10.0%	10.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	0.0%
2	6-10	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	1	0.5%	0.0%	4.3%	2.7%	0.0%	0.5%	55.2%	0.0%	36.1%	0.3%
3	2	0.0%	0.0%	8.9%	6.4%	0.0%	0.0%	69.7%	0.2%	14.0%	0.0%
3	3	0.3%	0.0%	9.4%	7.4%	0.0%	0.0%	75.1%	0.6%	6.9%	0.0%
3	4	0.0%	0.0%	14.4%	20.6%	0.0%	0.0%	59.8%	1.0%	3.1%	0.0%
3	5	0.0%	0.0%	66.1%	27.4%	1.6%	0.0%	0.0%	3.2%	0.0%	0.0%
3	6-10	0.0%	11.8%	38.2%	50.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	11+	0.0%	62.5%	25.0%	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	1	0.0%	0.0%	20.0%	0.0%	0.0%	2.7%	36.0%	0.0%	40.0%	0.0%
4	2	0.0%	0.0%	18.7%	3.7%	0.0%	0.4%	35.9%	0.0%	38.8%	0.0%
4	3	0.0%	0.0%	36.8%	6.9%	0.0%	0.0%	34.5%	3.4%	17.2%	0.0%
4	4	0.0%	0.0%	50.8%	6.8%	0.0%	0.0%	23.7%	15.3%	3.4%	0.0%
4	5	0.0%	0.0%	58.8%	32.4%	0.0%	0.0%	0.0%	8.8%	0.0%	0.0%
4	6-10	0.0%	18.5%	33.3%	48.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	11+	0.0%	76.9%	7.7%	15.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	1	1.0%	0.0%	19.6%	2.9%	0.0%	2.0%	49.0%	0.0%	25.5%	0.0%
5	2	0.4%	0.0%	25.3%	3.7%	0.0%	0.4%	39.2%	0.0%	30.0%	0.0%
5	3	0.0%	0.0%	41.0%	3.3%	0.0%	0.0%	37.7%	4.9%	11.5%	0.0%
5	4	0.0%	0.0%	56.8%	18.2%	0.0%	0.0%	13.6%	6.8%	2.3%	0.0%
5	5	0.0%	0.0%	52.3%	40.9%	0.0%	0.0%	0.0%	6.8%	0.0%	0.0%
5	6-10	0.0%	23.5%	23.5%	47.1%	2.0%	0.0%	0.0%	2.0%	0.0%	0.0%
5	11+	0.0%	57.1%	21.4%	7.1%	14.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	93.5%	0.0%	6.5%	0.0%
6	2	0.0%	0.0%	20.3%	5.8%	0.0%	1.4%	55.1%	0.0%	14.5%	0.0%
6	3	0.0%	0.0%	81.5%	3.7%	0.0%	0.0%	7.4%	0.0%	7.4%	0.0%

Fuente: Creación propia

Anexo B. Continuación de distribución de tipologías estructurales según estrato y cantidad de pisos según las encuestas de la Etapa I y Etapa II. – Parte 2

ESTRATO	HEIGHT	ADO/E	CR				MATO	MCF	MR	MUR	W
			LWAL	LDUAL	LFINF	LFM	LWAL	LO	LWAL	LWAL	LWAL
6	4	0.0%	0.0%	60.0%	0.0%	0.0%	0.0%	20.0%	10.0%	10.0%	0.0%
6	5	0.0%	0.0%	76.9%	23.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	6-10	0.0%	27.3%	45.5%	27.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	11+	0.0%	86.7%	6.7%	0.0%	6.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	1	4.8%	0.0%	13.3%	0.6%	0.0%	0.0%	33.3%	0.6%	40.6%	0.0%
2	2	2.2%	0.0%	27.0%	0.0%	0.0%	0.0%	46.7%	1.5%	22.6%	0.0%
2	3	0.0%	0.0%	26.2%	0.0%	0.0%	0.0%	53.8%	1.5%	18.5%	0.0%
2	4	0.0%	0.0%	58.3%	0.0%	0.0%	0.0%	41.7%	0.0%	0.0%	0.0%
2	5	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	1	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	58.3%	0.0%	30.6%	0.0%
3	2	2.6%	0.0%	11.5%	0.0%	0.0%	0.0%	65.4%	0.0%	20.5%	0.0%
3	3	0.0%	0.0%	30.8%	0.0%	0.0%	0.0%	61.5%	0.0%	7.7%	0.0%
3	4	0.0%	0.0%	40.0%	0.0%	0.0%	0.0%	60.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%
5	11+	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
1	1	0.0%	0.0%	62.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	37.5%	0.0%
1	2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	66.7%	0.0%	33.3%	0.0%
1	5	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	1	0.0%	0.0%	30.0%	0.0%	0.0%	0.0%	40.0%	0.0%	20.0%	0.0%
2	2	0.0%	0.0%	44.4%	0.0%	0.0%	0.0%	33.3%	0.0%	22.2%	0.0%
2	3	0.0%	0.0%	25.0%	0.0%	0.0%	0.0%	56.3%	0.0%	18.8%	0.0%
2	4	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	66.7%	0.0%	33.3%	0.0%
2	5	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%
2	6-10	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	1	8.3%	0.0%	33.3%	0.0%	0.0%	8.3%	8.3%	0.0%	41.7%	0.0%
3	2	0.0%	0.0%	20.0%	0.0%	0.0%	0.0%	50.0%	0.0%	30.0%	0.0%
3	3	0.0%	0.0%	16.7%	0.0%	0.0%	0.0%	66.7%	0.0%	16.7%	0.0%
3	4	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	5	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%
3	6-10	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	1	0.0%	0.0%	66.7%	0.0%	0.0%	0.0%	33.3%	0.0%	0.0%	0.0%
4	2	0.0%	0.0%	27.3%	0.0%	0.0%	0.0%	36.4%	0.0%	36.4%	0.0%
4	3	0.0%	0.0%	33.3%	0.0%	0.0%	0.0%	33.3%	0.0%	33.3%	0.0%
4	4	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	5	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	6-10	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	1	0.0%	0.0%	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	62.5%	0.0%	25.0%	0.0%

Fuente: Creación propia

Anexo C. Continuación de distribución de tipologías estructurales según estrato y cantidad de pisos según las encuestas de la Etapa I y Etapa II. – Parte 3

ESTRATO	HEIGHT	ADO/E	CR				MATO	MCF	MR	MUR	W
			LWAL	LDUAL	LFINF	LFM					
5	2	1.4%	0.0%	8.6%	1.4%	0.0%	0.0%	81.4%	0.0%	7.1%	0.0%
5	3	0.0%	0.0%	37.5%	0.0%	0.0%	0.0%	50.0%	0.0%	12.5%	0.0%
5	4	0.0%	0.0%	10.0%	20.0%	0.0%	0.0%	60.0%	0.0%	10.0%	0.0%
5	5	0.0%	0.0%	66.7%	16.7%	0.0%	0.0%	0.0%	16.7%	0.0%	0.0%
5	6-10	0.0%	0.0%	83.3%	8.3%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	11+	0.0%	0.0%	88.9%	11.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	77.8%	0.0%	11.1%	11.1%
6	2	0.0%	0.0%	28.6%	0.0%	0.0%	0.0%	71.4%	0.0%	0.0%	0.0%
6	3	0.0%	0.0%	66.7%	0.0%	0.0%	0.0%	33.3%	0.0%	0.0%	0.0%
6	4	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	5	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	6-10	0.0%	25.0%	75.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	11+	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
1	1	0.7%	0.0%	3.8%	0.0%	0.0%	0.0%	50.2%	0.0%	43.0%	2.3%
1	2	0.3%	0.0%	2.2%	0.0%	0.0%	0.0%	84.1%	0.0%	13.3%	0.1%
1	3	0.3%	0.0%	3.7%	0.6%	0.0%	0.0%	85.5%	0.0%	9.9%	0.0%
1	4	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	85.7%	0.0%	14.3%	0.0%
1	5	0.0%	0.0%	37.5%	50.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	12.5%	0.0%
1	11+	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	1	1.4%	0.0%	9.6%	0.1%	0.0%	0.3%	44.0%	0.0%	44.2%	0.3%
2	2	0.8%	0.0%	7.9%	0.1%	0.0%	0.1%	72.1%	0.0%	18.4%	0.0%
2	3	0.0%	0.0%	8.0%	0.5%	0.0%	0.0%	80.5%	0.8%	10.0%	0.0%
2	4	0.0%	0.0%	8.3%	0.9%	0.0%	0.0%	83.9%	0.0%	6.9%	0.0%
2	5	0.0%	0.0%	15.2%	32.9%	44.3%	0.0%	1.3%	3.8%	2.5%	0.0%
2	6-10	0.0%	20.0%	0.0%	80.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	11+	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	1	0.6%	0.0%	1.0%	0.5%	0.0%	0.3%	56.1%	0.0%	41.2%	0.2%
3	2	0.0%	0.0%	3.8%	0.4%	0.0%	0.0%	80.5%	0.1%	14.9%	0.0%
3	3	0.0%	0.0%	8.4%	1.4%	0.0%	0.0%	79.9%	0.2%	10.0%	0.0%
3	4	0.0%	0.0%	23.5%	4.9%	0.0%	0.0%	62.0%	0.9%	7.8%	0.0%
3	5	0.0%	0.0%	13.8%	5.6%	34.1%	0.0%	8.9%	36.7%	0.9%	0.0%
3	6-10	0.0%	22.2%	55.6%	16.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.6%	0.0%
3	11+	0.0%	66.7%	0.0%	0.0%	33.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	1	0.0%	0.0%	3.7%	1.0%	0.0%	0.0%	65.1%	0.0%	29.5%	0.3%

Fuente: Creación propia

Anexo D. Continuación de distribución de tipologías estructurales según estrato y cantidad de pisos según las encuestas de la Etapa I y Etapa II. – Parte 4

ESTRATO	HEIGHT	ADO/E	CR				MATO	MCF	MR	MUR	W
			LWAL	LDUAL	LFINF	LFM					
4	2	0.0%	0.0%	12.1%	0.4%	0.0%	0.2%	64.2%	0.1%	22.9%	0.0%
4	3	0.0%	0.0%	33.7%	2.1%	0.0%	0.0%	50.9%	0.6%	12.7%	0.0%

ESTRATO	HEIGHT	ADO/E	CR				MATO	MCF	MR	MUR	W
			LWAL	LDUAL	LFINF	LFM					
4	4	0.0%	0.0%	53.8%	5.6%	0.0%	0.0%	35.0%	1.4%	4.2%	0.0%
4	5	0.0%	0.0%	68.8%	11.6%	4.5%	0.0%	0.0%	13.4%	1.8%	0.0%
4	6-10	0.0%	9.3%	43.0%	10.5%	20.9%	0.0%	0.0%	15.1%	0.0%	0.0%
4	11+	0.0%	70.0%	20.0%	10.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	1	0.6%	0.0%	5.3%	1.6%	0.0%	0.6%	49.8%	0.3%	41.4%	0.0%
5	2	0.1%	0.0%	22.6%	1.4%	0.0%	0.2%	50.6%	0.8%	24.4%	0.0%
5	3	0.0%	0.0%	34.9%	5.6%	0.0%	0.0%	46.8%	2.2%	10.0%	0.0%
5	4	0.0%	0.0%	50.4%	15.7%	0.0%	0.0%	31.3%	0.0%	2.6%	0.0%
5	5	0.0%	0.0%	67.4%	23.6%	2.2%	0.0%	0.0%	5.6%	1.1%	0.0%
5	6-10	0.0%	29.3%	41.4%	24.1%	5.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	11+	0.0%	70.6%	17.6%	8.8%	2.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	1	0.0%	0.0%	9.7%	2.4%	0.0%	0.0%	73.4%	0.0%	13.7%	0.8%
6	2	0.7%	0.0%	23.0%	7.4%	0.0%	0.0%	61.4%	0.0%	7.0%	0.0%
6	3	0.0%	0.0%	41.2%	20.6%	0.0%	0.8%	34.4%	0.0%	3.1%	0.0%
6	4	0.0%	0.0%	48.8%	34.1%	0.0%	0.0%	12.2%	0.0%	4.9%	0.0%
6	5	0.0%	0.0%	55.8%	44.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	6-10	0.0%	47.6%	27.0%	23.8%	0.0%	0.0%	1.6%	0.0%	0.0%	0.0%
6	11+	0.0%	76.4%	21.8%	0.0%	1.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Fuente: Creación propia

Anexo E. Distribución de tipologías estructurales según estrato, material de pared y cantidad de viviendas – Parte 1

CANT VIVIENDAS	V_MAT_PARED	ESTRATO		
		1	2	3
1	1	ESQUEMAV-1-3_E-1-2	ESQUEMAV-1-3_E-1-2	ESQUEMAV-1-3_E-3-4
1	2	CR/LWAL+DUL/V:1	CR/LWAL+DUL/V:1	CR/LWAL+DUM/V:1
1	3	CR/LWAL+DUL/V:1	CR/LWAL+DUL/V:1	CR/LWAL+DUM/V:1
1	4	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1
1	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:1	ADOBE/LWAL+DNO/V:1	ADOBE/LWAL+DNO/V:1
1	6	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1
1	7	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1
1	8	MATO/V:1	MATO/V:1	MATO/V:1
2	1	ESQUEMAV-1-3_E-1-2	ESQUEMAV-1-3_E-1-2	ESQUEMAV-1-3_E-3-4
2	2	CR/LWAL+DUL/V:2	CR/LWAL+DUL/V:2	CR/LWAL+DUM/V:2
2	3	CR/LWAL+DUL/V:2	CR/LWAL+DUL/V:2	CR/LWAL+DUM/V:2
2	4	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2
2	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:2	ADOBE/LWAL+DNO/V:2	ADOBE/LWAL+DNO/V:2
2	6	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2
2	7	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2
2	8	MATO/V:2	MATO/V:2	MATO/V:2
3	1	ESQUEMAV-1-3_E-1-2	ESQUEMAV-1-3_E-1-2	ESQUEMAV-1-3_E-3-4
3	2	CR/LWAL+DUL/V:3	CR/LWAL+DUL/V:3	CR/LWAL+DUM/V:3
3	3	CR/LWAL+DUL/V:3	CR/LWAL+DUL/V:3	CR/LWAL+DUM/V:3
3	4	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3
3	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:3	ADOBE/LWAL+DNO/V:3	ADOBE/LWAL+DNO/V:3
3	6	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3
3	7	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3
3	8	MATO/V:3	MATO/V:3	MATO/V:3
4	1	ESQUEMAV-4-6_E-1-2	ESQUEMAV-4-6_E-1-2	ESQUEMAV-4-6_E-3-4
4	2	CR/LWAL+DUL/V:4	CR/LWAL+DUL/V:4	CR/LWAL+DUM/V:4
4	3	CR/LWAL+DUL/V:4	CR/LWAL+DUL/V:4	CR/LWAL+DUM/V:4
4	4	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4
4	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:4	ADOBE/LWAL+DNO/V:4	ADOBE/LWAL+DNO/V:4
4	6	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4
4	7	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4
4	8	MATO/V:4	MATO/V:4	MATO/V:4

Fuente: Creación propia

Anexo F. Continuación de la distribución de tipologías estructurales según estrato, material de pared y cantidad de viviendas – Parte 2

CANT VIVIENDAS	V_MAT_PARED	ESTRATO		
		1	2	3
5	1	ESQUEMAV-4-6_E-1-2	ESQUEMAV-4-6_E-1-2	ESQUEMAV-4-6_E-3-4
5	2	CR/LWAL+DUM/V:5	CR/LWAL+DUM/V:5	CR/LWAL+DUM/V:5
5	3	CR/LWAL+DUM/V:5	CR/LWAL+DUM/V:5	CR/LWAL+DUM/V:5
5	4	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5
5	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:5	ADOBE/LWAL+DNO/V:5	ADOBE/LWAL+DNO/V:5
5	6	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5
5	7	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5
5	8	MATO/V:5	MATO/V:5	MATO/V:5
6	1	ESQUEMAV-4-6_E-1-2	ESQUEMAV-4-6_E-1-2	ESQUEMAV-4-6_E-3-4
6	2	CR/LWAL+DUM/V:6	CR/LWAL+DUM/V:6	CR/LWAL+DUM/V:6
6	3	CR/LWAL+DUM/V:6	CR/LWAL+DUM/V:6	CR/LWAL+DUM/V:6
6	4	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6
6	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:6	ADOBE/LWAL+DNO/V:6	ADOBE/LWAL+DNO/V:6
6	6	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6
6	7	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6
6	8	MATO/V:6	MATO/V:6	MATO/V:6
6-40	1	ESQUEMAV-6-40_E-1-2	ESQUEMAV-6-40_E-1-2	ESQUEMAV-6-40_E-3-4
6-40	2	CR/LWAL+DUH/V:6-40	CR/LWAL+DUH/V:6-40	CR/LWAL+DUH/V:6-40
6-40	3	CR/LWAL+DUH/V:6-40	CR/LWAL+DUH/V:6-40	CR/LWAL+DUH/V:6-40
6-40	4	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40
6-40	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:6-40	ADOBE/LWAL+DNO/V:6-40	ADOBE/LWAL+DNO/V:6-40
6-40	6	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40
6-40	7	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40
6-40	8	MATO/V:6-40	MATO/V:6-40	MATO/V:6-40
+41	1	ESQUEMAV-+41_E-1-2	ESQUEMAV-+41_E-1-2	ESQUEMAV-+41_E-3-4
+41	2	CR/LWAL+DUH/V:+41	CR/LWAL+DUH/V:+41	CR/LWAL+DUH/V:+41
+41	3	CR/LWAL+DUH/V:+41	CR/LWAL+DUH/V:+41	CR/LWAL+DUH/V:+41
+41	4	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41
+41	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:+41	ADOBE/LWAL+DNO/V:+41	ADOBE/LWAL+DNO/V:+41
+41	6	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41
+41	7	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41
+41	8	MATO/V:+41	MATO/V:+41	MATO/V:+41

Fuente: Creación propia

Anexo G. Continuación de la distribución de tipologías estructurales según estrato, material de pared y cantidad de viviendas – Parte 3

CANT VIVIENDAS	V_MAT_PARED	ESTRATO		
		4	5	6
1	1	ESQUEMAV-1-3_E-3-4	ESQUEMAV-1-3_E-5-6	ESQUEMAV-1-3_E-5-6
1	2	CR/LWAL+DUH/V:1	CR/LWAL+DUH/V:1	CR/LWAL+DUH/V:1
1	3	CR/LWAL+DUH/V:1	CR/LWAL+DUH/V:1	CR/LWAL+DUH/V:1
1	4	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1
1	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:1	ADOBE/LWAL+DNO/V:1	ADOBE/LWAL+DNO/V:1
1	6	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1
1	7	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1	W/LO+DNO/V:1
1	8	MATO/V:1	MATO/V:1	MATO/V:1
2	1	ESQUEMAV-1-3_E-3-4	ESQUEMAV-1-3_E-5-6	ESQUEMAV-1-3_E-5-6
2	2	CR/LWAL+DUH/V:2	CR/LWAL+DUH/V:2	CR/LWAL+DUH/V:2
2	3	CR/LWAL+DUH/V:2	CR/LWAL+DUH/V:2	CR/LWAL+DUH/V:2
2	4	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2
2	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:2	ADOBE/LWAL+DNO/V:2	ADOBE/LWAL+DNO/V:2
2	6	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2
2	7	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2	W/LO+DNO/V:2
2	8	MATO/V:2	MATO/V:2	MATO/V:2
3	1	ESQUEMAV-1-3_E-3-4	ESQUEMAV-1-3_E-5-6	ESQUEMAV-1-3_E-5-6
3	2	CR/LWAL+DUH/V:3	CR/LWAL+DUH/V:3	CR/LWAL+DUH/V:3
3	3	CR/LWAL+DUH/V:3	CR/LWAL+DUH/V:3	CR/LWAL+DUH/V:3
3	4	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3
3	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:3	ADOBE/LWAL+DNO/V:3	ADOBE/LWAL+DNO/V:3
3	6	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3
3	7	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3	W/LO+DNO/V:3
3	8	MATO/V:3	MATO/V:3	MATO/V:3
4	1	ESQUEMAV-4-6_E-3-4	ESQUEMAV-4-6_E-5-6	ESQUEMAV-4-6_E-5-6
4	2	CR/LWAL+DUH/V:4	CR/LWAL+DUH/V:4	CR/LWAL+DUH/V:4
4	3	CR/LWAL+DUL/V:4	CR/LWAL+DUL/V:4	CR/LWAL+DUL/V:4
4	4	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4
4	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:4	ADOBE/LWAL+DNO/V:4	ADOBE/LWAL+DNO/V:4
4	6	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4
4	7	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4	W/LO+DNO/V:4
4	8	MATO/V:4	MATO/V:4	MATO/V:4
5	1	ESQUEMAV-4-6_E-3-4	ESQUEMAV-4-6_E-5-6	ESQUEMAV-4-6_E-5-6
5	2	CR/LWAL+DUH/V:5	CR/LWAL+DUH/V:5	CR/LWAL+DUH/V:5
5	3	CR/LWAL+DUH/V:5	CR/LWAL+DUH/V:5	CR/LWAL+DUH/V:5
5	4	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5
5	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:5	ADOBE/LWAL+DNO/V:5	ADOBE/LWAL+DNO/V:5

Fuente: Creación propia

Anexo H. Continuación de la distribución de tipologías estructurales según estrato, material de pared y cantidad de viviendas – Parte 4

CANT VIVIENDAS	V_MAT_PARED	ESTRATO		
		4	5	6
5	6	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5
5	7	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5	W/LO+DNO/V:5
5	8	MATO/V:5	MATO/V:5	MATO/V:5
6	1	ESQUEMAV-4-6_E-3-4	ESQUEMAV-4-6_E-5-6	ESQUEMAV-4-6_E-5-6
6	2	CR/LWAL+DUH/V:6	CR/LWAL+DUH/V:6	CR/LWAL+DUH/V:6
6	3	CR/LWAL+DUH/V:6	CR/LWAL+DUH/V:6	CR/LWAL+DUH/V:6
6	4	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6
6	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:6	ADOBE/LWAL+DNO/V:6	ADOBE/LWAL+DNO/V:6
6	6	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6
6	7	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6	W/LO+DNO/V:6
6	8	MATO/V:6	MATO/V:6	MATO/V:6
6-40	1	ESQUEMAV-6-40_E-3-4	ESQUEMAV-6-40_E-5-6	ESQUEMAV-6-40_E-5-6
6-40	2	CR/LWAL+DUH/V:6-40	CR/LWAL+DUH/V:6-40	CR/LWAL+DUH/V:6-40
6-40	3	CR/LWAL+DUH/V:6-40	CR/LWAL+DUH/V:6-40	CR/LWAL+DUH/V:6-40
6-40	4	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40
6-40	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:6-40	ADOBE/LWAL+DNO/V:6-40	ADOBE/LWAL+DNO/V:6-40
6-40	6	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40
6-40	7	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40	W/LO+DNO/V:6-40
6-40	8	MATO/V:6-40	MATO/V:6-40	MATO/V:6-40
+41	1	ESQUEMAV-+41_E-3-4	ESQUEMAV-+41_E-5-6	ESQUEMAV-+41_E-5-6
+41	2	CR/LWAL+DUH/V:+41	CR/LWAL+DUH/V:+41	CR/LWAL+DUH/V:+41
+41	3	CR/LWAL+DUH/V:+41	CR/LWAL+DUH/V:+41	CR/LWAL+DUH/V:+41
+41	4	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41
+41	5	ADOBE/LWAL+DNO/V:+41	ADOBE/LWAL+DNO/V:+41	ADOBE/LWAL+DNO/V:+41
+41	6	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41
+41	7	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41	W/LO+DNO/V:+41
+41	8	MATO/V:+41	MATO/V:+41	MATO/V:+41

Fuente: Creación propia

Anexo I. Matriz de distribución de tipologías estructurales para los materiales de pared – Parte 1

ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN	ESTRATO	RELACION VIVIENDAS	CR								
			LDUAL			LFINF			LFM		
			DUL	DUM	DUH	DUL	DUM	DUH	DUL	DUM	DUH
ESQUEMAV-1-3_E-1-2	1-2	1-3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
ESQUEMAV-4-6_E-1-2	1-2	4-6	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.8%	5.3%	6.0%
ESQUEMAV-6-40_E-1-2	1-2	6-40	5.0%	7.0%	8.0%	5.0%	7.0%	8.0%	15.0%	21.0%	24.0%
ESQUEMAV-+41_E-1-2	1-2	+41	20.0%	28.0%	32.0%	2.5%	3.5%	4.0%	2.5%	3.5%	4.0%
ESQUEMAV-1-3_E-3-4	3-4	1-3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.3%	1.8%	2.0%
ESQUEMAV-4-6_E-3-4	3-4	4-6	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	14.0%	16.0%	3.8%	5.3%	6.0%
ESQUEMAV-6-40_E-3-4	3-4	6-40	3.8%	5.3%	6.0%	16.3%	22.8%	26.0%	3.8%	5.3%	6.0%
ESQUEMAV-+41_E-3-4	3-4	+41	16.3%	22.8%	26.0%	6.3%	8.8%	10.0%	2.5%	3.5%	4.0%
ESQUEMAV-1-3_E-5-6	5-6	1-3	0.0%	0.0%	0.0%	6.3%	8.8%	10.0%	1.3%	1.8%	2.0%
ESQUEMAV-4-6_E-5-6	5-6	4-6	0.0%	0.0%	0.0%	13.8%	19.3%	22.0%	7.5%	10.5%	12.0%
ESQUEMAV-6-40_E-5-6	5-6	6-40	10.0%	14.0%	16.0%	8.0%	11.2%	12.8%	7.0%	9.8%	11.2%
ESQUEMAV-+41_E-5-6	5-6	+41	20.0%	28.0%	32.0%	3.8%	5.3%	6.0%	1.3%	1.8%	2.0%

Fuente: Creación propia

Anexo J. Matriz de distribución de tipologías estructurales para los materiales de pared – Parte 2

ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN	ESTRATO	RELACION VIVIENDAS /EDIFICACIONES	MATERIAL PARED	MCF			MR			MUR
				LWAL			LWAL			LWAL
				DUL	DUM	DUH	DUL	DUM	DUH	DNO
ESQUEMAV-1-3_E-1-2	1-2	1-3	1	16.3%	22.8%	26.0%	1.3%	1.8%	2.0%	30.0%
ESQUEMAV-4-6_E-1-2	1-2	4-6	1	15.0%	21.0%	24.0%	1.3%	1.8%	2.0%	20.0%
ESQUEMAV-6-40_E-1-2	1-2	6-40	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
ESQUEMAV-+41_E-1-2	1-2	+41	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
ESQUEMAV-1-3_E-3-4	3-4	1-3	1	17.5%	24.5%	28.0%	1.3%	1.8%	2.0%	20.0%
ESQUEMAV-4-6_E-3-4	3-4	4-6	1	8.8%	12.3%	14.0%	1.3%	1.8%	2.0%	5.0%
ESQUEMAV-6-40_E-3-4	3-4	6-40	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%	1.1%	1.2%	2.0%
ESQUEMAV-+41_E-3-4	3-4	+41	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
ESQUEMAV-1-3_E-5-6	5-6	1-3	1	12.5%	17.5%	20.0%	1.3%	1.8%	2.0%	15.0%
ESQUEMAV-4-6_E-5-6	5-6	4-6	1	2.5%	3.5%	4.0%	1.3%	1.8%	2.0%	0.0%
ESQUEMAV-6-40_E-5-6	5-6	6-40	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
ESQUEMAV-+41_E-5-6	5-6	+41	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Fuente: Creación propia