



INFORME TÉCNICO

“EVALUACIÓN DE RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHIGUAZA – INFORME DE ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD”

Elaborado por:

María Carolina Rogelis Prada – mrogelis@idiger.gov.co

Supervisión por:

Carolina Castañeda Jiménez – acastaneda@idiger.gov.co

SUBDIRECCIÓN DE ANÁLISIS DE RIESGOS Y EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

GRUPO DE ESTUDIOS Y DISEÑOS

DICIEMBRE 2022

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Introducción	6
2. Alcance y limitaciones	6
3. Metodología	7
3.1 Marco conceptual	7
3.2 Metodología general aplicada y datos	9
3.3 Identificación de curvas de vulnerabilidad aplicables a las construcciones residenciales de la cuenca	11
3.4 Generación de un indicador de vulnerabilidad física	12
3.5 Consideraciones iniciales para la evaluación de la vulnerabilidad social	12
4. Caracterización de las construcciones existentes en la cuenca de la quebrada Chiguaza	13
4.1 Características generales de las construcciones	13
4.2 Características de la ocupación urbana en la cuenca de la Quebrada Chiguaza	14
5. Asignación de sistema estructural y tipología	22
6. Valor de las construcciones de tipo residencial	24
7. Población	27
8. Archivo shape de tipología estructural, valor de elementos y población	28
9. Vulnerabilidad	29
9.1 Curvas de vulnerabilidad	29
9.2 Vulnerabilidad de las personas	33
9.3 Indicador de vulnerabilidad física	33
9.4 Vulnerabilidad física en el área preliminar de exposición	47
9.5 Consideraciones iniciales para la evaluación de la vulnerabilidad social	53
10. Conclusiones y recomendaciones	56
11. Referencias	58
ANEXO A. Procedimiento para la asignación de tipología estructural	62
ANEXO B. Recopilación de curvas de vulnerabilidad existentes	70
B.1 Curvas de vulnerabilidad desarrolladas por Lo et al. (2012)	70
B.2 Curvas de vulnerabilidad desarrolladas por el proyecto RiskScope (Reese and Ramsay, 2010)	71
B.3 Curvas desarrolladas por CAPRA y utilizadas por JBA (2019) en ciudad de Panamá	72
B.4 Curvas desarrolladas por la UNAL (2006)	75

B.5 Curva de fragilidad desarrollada por Prieto et al. (2018) 79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Enfoque general para el análisis de vulnerabilidad física en la quebrada Chiguaza ... 10

Figura 2. Metodología general para la construcción de una tipología de viviendas en la cuenca de la quebrada Chiguaza 10

Figura 3. Voladizos de las construcciones representadas como polígonos en la cobertura de la UAECD..... 13

Figura 4. Porcentaje de construcciones con información IDECA y con fotointerpretación con información de campo 14

Figura 5. Barrios legalizados en la cuenca de la Quebrada Chiguaza..... 14

Figura 6. Construcciones por año de construcción. a) número de construcciones por periodo; b) porcentaje de construcciones para los periodos de mayor dinámica de ocupación 15

Figura 7. Vetustez de las construcciones..... 16

Figura 8. Construcciones por categoría de uso. a) número de construcciones por tipo de uso; b) porcentaje de construcciones por tipo de uso 16

Figura 9. Construcciones de uso comercial y de servicios en la cuenca de la quebrada Chiguaza 17

Figura 10. Construcciones de uso comercial y de servicios en la cuenca de la quebrada Chiguaza 19

Figura 11. Construcciones de uso industrial en la cuenca de la quebrada Chiguaza..... 20

Figura 12. Cantidad de construcciones por categoría de número de pisos. a) número de construcciones por categoría de número de pisos; b) porcentaje de construcciones por categoría de número de pisos..... 21

Figura 13. Construcciones por estrato. a) número de construcciones por estrato; b) porcentaje de construcciones por estrato 21

Figura 14. Cantidad de construcciones según tipo de sistema estructural. a) número de construcciones por sistema estructural; b) porcentaje de construcciones por sistema estructural 22

Figura 15. Porcentaje de construcciones por sistema estructural..... 23

Figura 16. Cantidad de construcciones según tipo de sistema estructural 24

Figura 17. Diagramas de caja del área construida de construcciones residenciales según estrato 25

Figura 18. Diagramas de caja del avalúo catastral según estrato para viviendas en la cuenca de la quebrada Chiguaza 26

Figura 19. Diagramas de caja del avalúo comercial según estrato para viviendas en la cuenca de la quebrada Chiguaza	26
Figura 20. Densidad poblacional por estrato	27
Figura 21. Marco metodológico para el cálculo de índices de vulnerabilidad	36
Figura 22. Diagramas de caja de los valores del indicador de sistema estructural para construcciones residenciales.....	38
Figura 23. Diagramas de caja de los valores del indicador de número de pisos para construcciones residenciales.....	39
Figura 24. Diagramas de caja de los valores del indicador de perímetro no colindante	39
Figura 25. Diagramas de caja del área de la huella de las construcciones	40
Figura 26. Diagramas de caja de los valores del indicador de tamaño.....	41
Figura 27. Matriz de correlación de los indicadores	42
Figura 28. Diagramas de caja del valor del indicador de vulnerabilidad física para las viviendas de la cuenca	43
Figura 29. Diagramas de caja de los indicadores y del IVF para cada grupo	44
Figura 30. Gráficas de densidad y caja de los valores del IVF para los grupos de IVF bajo, medio y alto	45
Figura 31. Indicador de vulnerabilidad física (IVF) con las categorías dadas por los límites en la Figura 30	45
Figura 32. Indicadores de tamaño (It), perímetro no colindante (Ipnc), número de pisos (Inp) y sistema estructural (Ise)	46
Figura 33. a) amenaza por avenida torrencial POT 2022, b) extensión de la inundación con el periodo de retorno de 25 años (JICA, 2006), y c) área preliminar de exposición	47
Figura 34. Densidades de edificaciones, personas y valores para toda la cuenca.....	48
Figura 35. Densidades de edificaciones, personas y valores para la zona preliminar de exposición	49
Figura 36. Hotspots (puntos calientes) para diferentes variables	50
Figura 37. Hotspots (puntos calientes) para el IVF	51
Figura 38. Resumen de características de la zona preliminar de exposición	52
Figura 39. a) Indicador de pobreza multidimensional (IPM); b) Indicador de pobreza multidimensional normalizado; y c) Índice preliminar de vulnerabilidad.....	55
Figura 40. Parte inicial del algoritmo para generar el sistema estructural de las construcciones	67
Figura 41. Diagrama modificado de asignación de Sistema estructural parte A.....	67
Figura 42. Algoritmo modificado para generar sistema estructural – Parte B	68
Figura 43. Diagrama modificado de asignación de sistema estructural – Parte C.....	68
Figura 44. Diagrama modificado de asignación de sistema estructural – Parte D.....	69



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipo de construcciones dotacionales en la cuenca de la quebrada Chiguaza.....	18
Tabla 2. Tabla del archivo shape generado con las construcciones existentes en la cuenca de la quebrada Chiguaza	28
Tabla 3. Porcentaje de afectación por inundación de una vivienda localizada en una zona de índice de marginación muy alto.....	32
Tabla 4. Tasa de daños a contenidos/daños a la estructura en función de la profundidad	33
Tabla 5. Comparación de relevancia de indicadores según amenaza.....	34
Tabla 6. Variables consideradas para construir indicadores de vulnerabilidad física	36
Tabla 7. Categorías de sistemas estructurales y puntaje asignado	37
Tabla 8. Uso y cantidad de construcciones en la zona preliminar de exposición	51
Tabla 9. Información disponible para la construcción de la base de datos de exposición	62
Tabla 10. Categoría de uso	64
Tabla 11. Códigos de uso del suelo de catastro	65
Tabla 12. Códigos de calificación según catastro de: almacén y muros	66
Tabla 13. Sistemas estructurales	69

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la vulnerabilidad constituye un componente fundamental de la evaluación de riesgo, que representa una gran variedad de retos debido a sus múltiples dimensiones y complejidad. Este reporte presenta el informe de la metodología y resultados de evaluación de la vulnerabilidad física a inundaciones y avenidas torrenciales en la cuenca de la quebrada Chiguaza como parte del estudio de riesgo de la cuenca.

La vulnerabilidad se aborda en su dimensión física mediante dos enfoques: uno cuantitativo que busca la identificación de curvas de vulnerabilidad aplicables a las construcciones residenciales de la cuenca y otro basado en indicadores que busca identificar las variables principales que determinan la vulnerabilidad física y traducirlas en un indicador.

En el entendido de que otras dimensiones de la vulnerabilidad además de la física son igualmente relevantes, se realizó una exploración inicial de la vulnerabilidad social cuya finalidad es principalmente identificar los retos para el avance del conocimiento de la vulnerabilidad de cara a los estudios futuros a ser desarrollados en la ciudad.

2. ALCANCE Y LIMITACIONES

El análisis de vulnerabilidad se concentra en el daño directo a unidades residenciales. Otro tipo de elementos existentes no es considerado. Lo anterior debe tenerse en cuenta para la interpretación del análisis ya que la infraestructura crítica, edificios destinados a uso no residencial, vías, líneas vitales y vehículos no serán abordados a profundidad. Es claramente reconocido que el inventario de elementos expuestos no debe limitarse a las construcciones residenciales. Sin embargo, este el trabajo presentado en este documento es el primer paso en el avance del conocimiento de la vulnerabilidad a inundaciones y avenidas torrenciales bajo las condiciones específicas de Bogotá luego del estudio desarrollado en 2006 por la UNAL (2006) y del estudio de vulnerabilidad elaborado en la quebrada Limas en 2021 (IDIGER, 2021) por lo cual constituye una primera fase que a futuro deberá continuarse para avanzar en el conocimiento de la vulnerabilidad en Bogotá.

De otro lado, la vulnerabilidad física se aborda a través de dos métodos: (i) la exploración de curvas de vulnerabilidad propuestas en la literatura; y (ii) desarrollo de un indicador de vulnerabilidad física. En el primer caso, el uso de curvas reportadas en la literatura representa una limitación importante debido a que no se cuenta con datos en la zona de estudio que permita el desarrollo de curvas de vulnerabilidad empíricas y el estudio no tiene el alcance para explorar otros métodos de generación de curvas de vulnerabilidad. En el segundo caso, para el desarrollo del indicador de vulnerabilidad física se utilizan pesos aplicados a subindicadores generados por juicio experto reportados en la literatura para otras áreas. Es importante tener en cuenta que diferentes expertos pueden asignar diferentes pesos en un sistema de indicadores.

El análisis de vulnerabilidad está limitado a los daños directos que puedan sufrir las viviendas. En cuando a la vulnerabilidad humana, aunque se genera dentro del análisis un estimado de población en la cuenca asociado a las construcciones existentes, este estudio no tiene el alcance para establecer un modelo de vulnerabilidad humana.

El análisis de vulnerabilidad para este informe tiene un alcance limitado a la exploración de las viviendas y personas expuestas. Las actividades económicas, líneas vitales, infraestructura crítica, vías y otros elementos que podrían estar localizadas en zonas de amenaza y que por lo tanto requieren un análisis de exposición y vulnerabilidad particular, no serán abordadas en este estudio. Su análisis se podrá realizar en etapas posteriores o por cada sector individualmente.

Aspectos relacionados con la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático están fuera del alcance de este estudio. En análisis futuros deberá incorporarse la evaluación de resiliencia que permita entender la capacidad de las comunidades y la ciudad para manejar las incertidumbres asociadas al cambio climático, lo mismo que la capacidad de adaptarse.

Este informe está enfocado en la vulnerabilidad física. Se reconoce que otras dimensiones de la vulnerabilidad son muy importantes y se recomienda que en estudios posteriores se desarrollen estudios de resiliencia y vulnerabilidad socioeconómica.

3. METODOLOGÍA

3.1 MARCO CONCEPTUAL

La **exposición** está definida como *la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza (Ley 1523 de 2012) (SNGRD, 2017)*. La exposición es principalmente dependiente de la localización geográfica y en términos simples corresponde a las actividades humanas afectadas por un evento amenazante (Su y Kang 2005).

Aunque no existe una definición universal de vulnerabilidad, varias disciplinas han desarrollado sus propias definiciones y visiones analíticas (Birkmann, 2006). La definición de **vulnerabilidad** según la legislación colombiana corresponde a: *susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos (Congreso de Colombia, 2012)*. La definición del IPCC¹ es consistente con esta definición y corresponde a: *propensión o predisposición a ser afectado de manera adversa (Lavell et al., 2012)*. Además el IPCC indica que la predisposición constituye una característica interna del elemento afectado e incluye las características de una persona o un grupo y su situación, que influencia su capacidad de anticipar, manejar, resistir y recuperarse de los efectos adversos de eventos físicos (Lavell et al., 2012). En estas definiciones hay aspectos relevantes que muchos autores resaltan de la vulnerabilidad (Birkmann, 2006; Vogel y O'Brien 2004):

- La vulnerabilidad es una característica intrínseca del elemento expuesto
- La vulnerabilidad es multidimensional y diferencial (varía en el espacio físico y entre y dentro de grupos sociales)
- Depende de la escala de evaluación (varía en el tiempo, espacio y unidades de análisis tales como individuos, hogares, regiones o sistemas)
- Es dinámica (las características e impulsores de la vulnerabilidad cambian en el tiempo)

Aunque la vulnerabilidad de una comunidad tiene dimensiones sociales, económicas, físicas, ambientales, institucionales y culturales (Birkmann et al., 2013), estas dimensiones están interconectadas (Malgwi, Fuchs y Keiler, 2020). Por ejemplo, el nivel de ingresos de los habitantes se refleja en lo robusto de las viviendas (Fuchs et al., 2019), así como la aplicación de códigos constructivos, que en el caso de la quebrada Chiguaza está directamente relacionado con el

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

origen de las viviendas (formal o informal). Por esta razón es esencial estudiar las diferentes dimensiones de la vulnerabilidad y sus interacciones (Fuchs *et al.*, 2019).

Fuchs *et al.* (2019) clasifica los métodos existentes de evaluación de vulnerabilidad en tres clases: matrices de vulnerabilidad, curvas de vulnerabilidad e indicadores de vulnerabilidad. Dependiendo de los datos de entrada, los modelos de vulnerabilidad pueden ser cualitativos (descritos con palabras), semicuantitativos (representados en una escala relativa, también llamados categóricos) o cuantitativos (descritos como un número sin dimensiones de 0 a 1) (Eidsvig *et al.*, 2014). Los modelos de vulnerabilidad también pueden ser divididos en (Eidsvig *et al.*, 2014): i) aquellos que describen el grado de pérdida como una función de la intensidad de la amenaza; y ii) aquellos que describen la probabilidad de exceder un estado de daño para diferentes intensidades, donde la definición de los estados de año es parte del modelo de vulnerabilidad. Los primeros resultan en una curva de vulnerabilidad y los segundos en una curva de fragilidad.

En general las curvas de vulnerabilidad son uno de los métodos más usados para la evaluación de la vulnerabilidad física² (Fuchs *et al.*, 2019) mientras que el uso de indicadores es utilizado para hacer evaluaciones holísticas de vulnerabilidad y riesgo donde además de la dimensión física se consideran otras dimensiones de la vulnerabilidad. Sin embargo, no existe un método único ni curvas de vulnerabilidad únicas y aplicables en todos los casos, por el contrario las curvas de vulnerabilidad existentes son específicas para el sitio donde fueron desarrolladas (Fuchs, Heiss and Hübl, 2007). La transferibilidad de curvas de una región a otra es un aspecto que es muy discutible y que tiene pocos estudios. En teoría curvas de daños de una región similar a la región de estudio en donde son similares tanto los sistemas constructivos como las características de las inundaciones, deberían estimar el daño suficientemente bien, sin embargo se requiere más investigación en este campo para validar la transferibilidad de las funciones en espacio y tiempo (Marvi, 2020).

Las curvas de vulnerabilidad constituyen el único método puramente cuantitativo para evaluar la vulnerabilidad de elementos expuestos (Fuchs *et al.*, 2019). Una curva o función de vulnerabilidad es una curva continua que relaciona la intensidad de una amenaza (eje X) y el estado de daño de una construcción (eje Y) (Tarbotton *et al.*, 2015). Las curvas de vulnerabilidad pueden definirse en términos del daño absoluto o relativo (Olesen, Löwe y Arnbjerg-Nielsen, 2017).

La construcción de estas curvas implica una alta incertidumbre. Las curvas de vulnerabilidad disponibles en la literatura en general aplican métodos que difieren para cada caso y pueden tener criterios con diferencias importantes en cuanto al comportamiento de los elementos expuestos para determinados niveles de intensidad dependiendo de las características estructurales y de las condiciones de flujo que se usaron para su definición. Para una revisión de avances en el desarrollo de curvas de vulnerabilidad ver Fuchs *et al.* (2019). Debido a las limitaciones que tienen las curvas de vulnerabilidad se han desarrollado otros métodos como el uso de indicadores.

Las curvas de vulnerabilidad pueden ser desarrolladas utilizando datos empíricos y métodos sintéticos o conocimiento experto. Los métodos empíricos requieren datos de profundidad de flujo

² La vulnerabilidad física en específico se define como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos dentro de un área afectada por una amenaza y se expresa en una escala de 0 (sin pérdida) a 1 (pérdida total) (Fuchs *et al.*, 2019).

relacionados con patrones de daño o pérdidas monetarias luego de los eventos de inundación. Estos datos permiten el ajuste de curvas para correlacionar profundidades de flujo con daño o pérdidas. Los métodos sintéticos están basados en escenarios de análisis derivados de conocimiento experto para determinar el daño esperado para intervalos seleccionados de profundidad de flujo (Pistrika, Tsakiris and Nalbantis, 2014). Los enfoques multivariados deducen las relaciones entre los datos empíricos de daños o pérdidas y múltiples parámetros que influyen el daño (Malgwi, Fuchs and Keiler, 2020). Sin embargo, para obtener las curvas de vulnerabilidad un limitante importante es la falta de datos. En la práctica las curvas de daño que utilizan datos empíricos generalmente se obtienen de muestra pequeñas de construcciones afectadas. Debido a la dificultad de cuantificar daños cuando ocurren eventos de gran magnitud, generalmente las curvas se derivan de datos de daño ocurridos con inundaciones no muy profundas y posteriormente se extrapolan para profundidades más altas, lo que genera incertidumbres importantes. Las curvas basadas en conocimiento experto se basan en el principio de analizar escenarios, por lo cual no requieren la observación de daños pero son dependientes del conocimiento de los expertos (Olesen, Löwe y Arnbjerg-Nielsen, 2017). Las curvas de vulnerabilidad también pueden clasificarse en relativas o absolutas. Las primeras cuantifican el daño como un porcentaje del valor total del reemplazo de la estructura afectada mientras que las absolutas usan el valor monetario absoluto del daño por elemento (Pistrika, Tsakiris and Nalbantis, 2014).

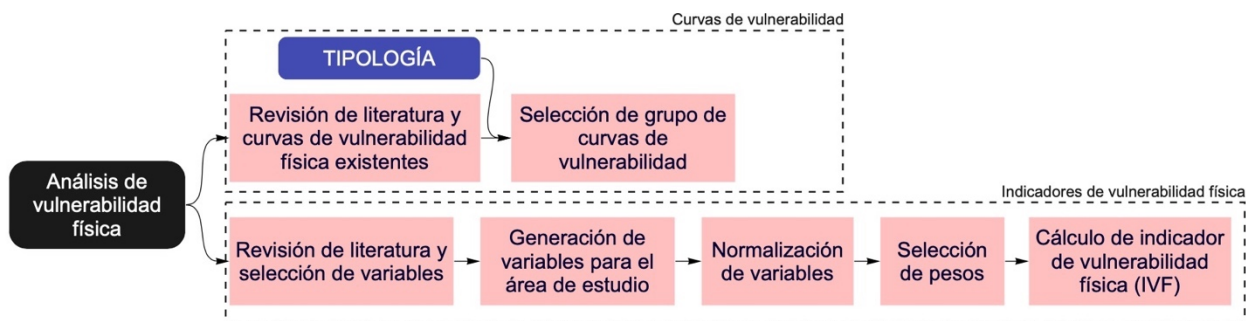
Un indicador de vulnerabilidad es un parámetro o variable que puede influir y/o comunicar el grado de daño (o pérdida) de un sistema (Malgwi, Fuchs and Keiler, 2020). Los indicadores conducen a la construcción de índices en un marco que indica cómo se combinan a través de pesos y en donde claramente se establece el objetivo de cada indicador, la dimensión de la vulnerabilidad a la que pertenece, la escala espacial y la región de aplicación (Malgwi, Fuchs and Keiler, 2020).

El uso de indicadores es reconocido como de alta importancia para para la reducción de riesgo. Los indicadores de vulnerabilidad están basados en variables agregadas para comunicar el estado de un sistema y proporcionar información sobre el nivel al cual el sistema será impactado por cierto nivel de amenaza (Birkmann, 2006). Ya que los indicadores tienen bajos requerimientos de datos empíricos o datos de daños, este tipo de métodos es ampliamente usado en zonas con escasez de datos. Constituyen además un muy buen complemento a los datos de curvas de daño ya que permiten tener una visión más holística o completa de la vulnerabilidad (Malgwi, Fuchs and Keiler, 2020). Los enfoques que utilizan escalas de daño o indicadores son en general más adecuados en áreas con escasez de datos; sin embargo tienen el problema de la dificultad en la forma de vincular los indicadores de manera sistemática (Malgwi, Fuchs and Keiler, 2020).

3.2 METODOLOGÍA GENERAL APLICADA Y DATOS

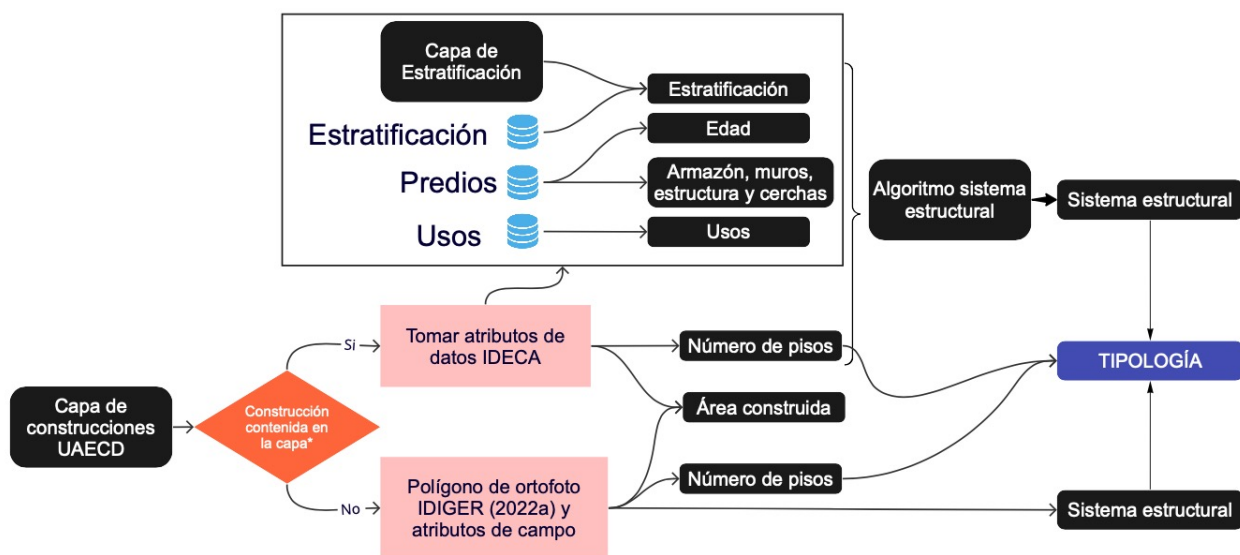
El análisis de vulnerabilidad física de la cuenca de la quebrada Chiguaza ante inundaciones y avenidas torrenciales se llevó a cabo a través de dos enfoques (ver Figura 1): (1) identificación de curvas de vulnerabilidad aplicables a las construcciones residenciales de la cuenca; y (2) generación de un indicador de vulnerabilidad física.

Figura 1. Enfoque general para el análisis de vulnerabilidad física en la quebrada Chiguaza



La Figura 2 muestra la metodología general junto con las fuentes de datos que se utilizaron para generar una clasificación tipológica de las construcciones residenciales de la cuenca de la quebrada Chiguaza.

Figura 2. Metodología general para la construcción de una tipología de viviendas en la cuenca de la quebrada Chiguaza



Nota: *Decisión tomada de la comparación de la capa de construcciones con la ortofoto IDIGER (2022b)

La exposición en la quebrada Chiguaza se analizó desde la perspectiva de la creación de una base de datos para el análisis de riesgo. La base de datos de exposición constituirá el conjunto de datos de entrada para asignar curvas de vulnerabilidad y para generar los indicadores de vulnerabilidad física, por lo cual la generación de una clasificación por tipología de construcción es fundamental. Esta podrá asociarse con una(s) curva(s) de vulnerabilidad para el análisis de riesgo, un valor y un número de personas expuestas.

Partiendo de una capa de construcciones existentes (no necesariamente expuestas a inundaciones o avenidas torrenciales) en la cuenca de la quebrada Chiguaza generada por IDIGER (2022a), a cada construcción se le asignó una tipología estructural siguiendo los procedimientos desarrollados por el IDIGER (Prieto, 2018) para evaluación de amenaza sísmica. Se tomó la decisión de utilizar este enfoque, debido al valor agregado de generar una base de datos que pueda ser utilizada para la evaluación de riesgo por múltiples amenazas y que no solo

se limite a la evaluación de riesgo por inundaciones o avenidas torrenciales. Cabe mencionar que la tipología estructural utilizada por el IDIGER para la evaluación de riesgo sísmico, indica los parámetros de número de pisos y material de construcción que son los más importantes para la evaluación de la vulnerabilidad a inundaciones y avenidas torrenciales. El método detallado usado para la asignación del sistema y tipología estructural siguiendo los lineamientos de IDIGER para amenaza sísmica se presenta en el ANEXO A.

La mayoría de los predios de la cuenca tienen información generada por la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (UAECD), disponible en IDECA³. Sin embargo, de la comparación de la capa de construcciones de la UAECD con la ortofoto capturada en 2022 (IDIGER, 2022b), IDIGER (2022a) identificó construcciones adicionales que fueron digitalizadas, y mediante trabajo de campo, asignó los atributos de número de pisos, sistema estructural y uso de la construcción (para detalles de este procedimiento consultar IDIGER (2022a)). Una vez revisada la capa de construcciones desarrollada por IDIGER (2022a) se encontró que para 144 construcciones no existía información estructural que permitiera la aplicación del algoritmo de asignación de sistema estructural. Para estas construcciones, el sistema estructural se asignó utilizando tanto Google Street View como la tipología para evaluación de riesgo sísmico (si existe).

Para eventos de inundaciones súbitas, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos, los parámetros más utilizados en la literatura para clasificación tipológica son el número de pisos, tipo estructural, tipo de techo y proporción, tipo y calidad de puertas y ventanas de la casa (Thouret *et al.*, 2014). El techo juega un papel menor en la respuesta de las estructuras en el caso de las inundaciones súbitas (Thouret *et al.*, 2014) por lo que no será utilizado como criterio tipológico. En el caso de los orificios de la vivienda —que están constituidas por ventanas y puertas— estas han sido consideradas por varios autores como un elemento importante en el nivel de daño de estructuras expuestas a flujos con alta concentración de sedimentos en especial en el rango de los flujos de detritos, sin embargo, no se utilizó debido a que no se dispone de esta información.

Aunque la práctica estándar es asignar a los elementos expuestos el valor de reconstrucción o reemplazo (Azmeri e Isa 2018a), el IDIGER utiliza el valor catastral dentro de sus cálculos de riesgo. El valor catastral se obtuvo de la base de datos de la UAECD a julio de 2021 que tiene valores por metro cuadrado a nivel de manzana. Con base en la información de avalúo catastral y comercial por metro cuadrado y las áreas de las construcciones se asignó a cada construcción un campo de valor (tanto comercial como catastral).

Con el fin de asignar un número de población expuesta en cada construcción, se utilizó la información del DANE⁴ a nivel de manzana. Debido a que los códigos de las manzanas y los polígonos de las manzanas del DANE son diferentes a los de la UAECD, se hizo una identificación para cada construcción del código de manzana del DANE mediante una intersección espacial y la población de cada manzana se distribuyó en las construcciones proporcional al área.

3.3 IDENTIFICACIÓN DE CURVAS DE VULNERABILIDAD APLICABLES A LAS CONSTRUCCIONES RESIDENCIALES DE LA CUENCA

En principio, cada bien expuesto tiene su propia función de vulnerabilidad específica. Sin embargo, no es práctico determinar funciones de vulnerabilidad para cada uno de los bienes

³ IDECA - Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital. <https://www.ideca.gov.co/>

⁴ https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/643/get_microdata

expuestos. Por lo que se define un catálogo de clases estructurales con funciones de vulnerabilidad asignadas a cada una de ellas. Posteriormente, cada uno de los bienes expuestos individuales se clasifica de acuerdo con los tipos estructurales que constituyen el catálogo (Ordaz, Torres and Domínguez, 2013). Las funciones de vulnerabilidad deben construirse de tal forma que, para diversos niveles de intensidad, quede definida la distribución de probabilidad de las pérdidas que se presentarían. Esto se consigue, usualmente, haciendo que las funciones de vulnerabilidad especifiquen curvas que relacionen el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno (Ordaz, Torres y Domínguez, 2013). La desviación estándar de los residuos del daño a cada profundidad es una de las formas de considerar la incertidumbre de las curvas de daño (Marvi, 2020). También es posible llevar a cabo análisis de sensibilidad para estudiar que variables del modelo de vulnerabilidad influyen en mayor medida en los resultados de riesgo (Marvi, 2020). Otro método para considerar la incertidumbre es usar curvas de fragilidad en lugar de curvas de daño, sin embargo todavía es necesario avanzar en la verificación de este tipo de curvas para llegar a modelos más sofisticados como por ejemplo los desarrollados en el caso de sismo (Marvi, 2020). Para seleccionar curvas de vulnerabilidad aplicables a las construcciones residenciales de la quebrada Chiguaza, se realizó una revisión de literatura y se escogieron curvas potencialmente aplicables según las características de los sistemas estructurales identificados en la cuenca.

3.4 GENERACIÓN DE UN INDICADOR DE VULNERABILIDAD FÍSICA

Para generar un indicador de vulnerabilidad física, se llevó a cabo una revisión de literatura para identificar las variables que pueden servir de indicadores. Las variables se calcularon a nivel de construcción y fueron normalizadas para constituir indicadores que describen las principales características que determinan la vulnerabilidad física. Estos indicadores fueron combinados linealmente mediante pesos para construir un indicador compuesto de vulnerabilidad física (IVF). Los pesos para realizar la combinación lineal fueron obtenidos de la literatura.

3.5 CONSIDERACIONES INICIALES PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SOCIAL

Como contribución a la evaluación holística futura de la vulnerabilidad, se realizó una exploración inicial del indicador de pobreza multidimensional - IPM (DANE, 2018).⁵ Este indicador se asignó a las construcciones, se normalizó y se combinó mediante un promedio con el IVF. Este análisis no pretende realizar una evaluación detallada de la vulnerabilidad social, sino realizar una aproximación inicial mediante el uso del IPM que se encuentra disponible a nivel de manzana.

Las siguientes secciones discuten en detalle el procedimiento realizado y los análisis llevados a cabo.

⁵ El Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) adoptado para Colombia es un índice integrado que permite analizar múltiples dimensiones de la pobreza que son experimentadas simultáneamente por los hogares (unidad de análisis para este fin). Este índice se compone de 5 dimensiones (condiciones educativas del hogar; condiciones de la niñez y la juventud; trabajo; salud y acceso a servicios públicos domiciliarios y condiciones de la vivienda), que agrupan 15 indicadores, cada indicador a su vez tiene un punto de corte definido para el cual un hogar es considerado en privación. Además, para el caso de esta medición en Colombia se utiliza una estructura de ponderación anidada, en la que cada dimensión tiene el mismo peso (20%) en el índice y cada indicador tiene el mismo peso al interior de cada dimensión (DANE, 2018).

4. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES EXISTENTES EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHIGUAZA

4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS CONSTRUCCIONES

La base de datos de construcciones existentes completa, obtenida mediante la complementación de la información disponible en IDECA con digitalización de la ortofoto IDIGER (2022b) e información de campo (IDIGER, 2022a), resultó en 124,042 polígonos de construcciones en la cuenca. Varios de estos polígonos comparten el mismo código de lote, es decir, dentro de un lote pueden existir varias construcciones que han sido identificados por la UAECD con un polígono independiente. La capa generada tiene 2,239 construcciones dentro de la cuenca que no tienen código de lote de catastro, debido a que fueron digitalizadas y se encontraron no coincidentes con lotes identificados por la UAECD; y tiene 50,052 código únicos de lote. Además, algunos de los polígonos de la capa corresponden a extensiones generadas en los segundos o más pisos en forma de voladizo que son representados en la información geográfica de la UAECD como un polígono adicional con el mismo código del lote (ver Figura 3). Al retirar esos polígonos se encontró que el número de construcciones en la cuenca es 86,287.

Figura 3. Voladizos de las construcciones representadas como polígonos en la cobertura de la UAECD.

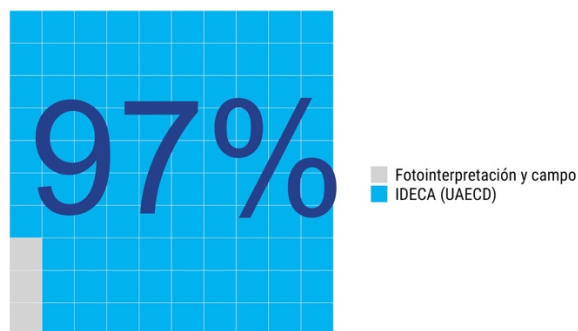


Fuente de capa geográfica de construcciones: UAECD (2021)

Nota: en rojo se muestran los polígonos identificados como voladizos de las construcciones. En azul se muestran las construcciones con las divisiones generadas por la UAECD

Cabe aclarar que los análisis subsiguientes se centrarán en las construcciones identificadas y que no tienen el alcance para evaluar otro tipo de infraestructura. Del total de construcciones en la cuenca, el 97% estaba identificada en la información de IDECA, de este 97%, 144 construcciones no tienen información detallada de características estructurales que permitan la asignación de sistema estructural. El 3% restante corresponde a construcciones identificadas por IDIGER (2022a) con fotointerpretación y con características obtenidas de información de campo. Para las 144 construcciones sin información estructural de IDECA se utilizó Google Street View para asignar el sistema estructural.

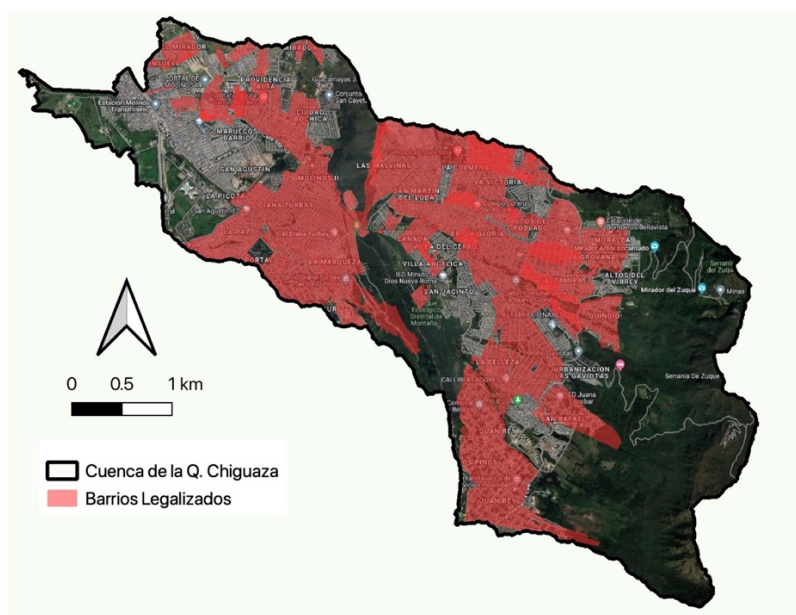
Figura 4. Porcentaje de construcciones con información IDECA y con fotointerpretación con información de campo



4.2 CARACTERÍSTICAS DE LA OCUPACIÓN URBANA EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHIGUAZA

La mayoría de las construcciones en la cuenca de la quebrada Chiguaza son de origen informal. La Figura 5 muestra los barrios legalizados⁶ en la quebrada Chiguaza, reflejando que la mayoría de las construcciones pertenecen desarrollos informales que fueron legalizados.

Figura 5. Barrios legalizados en la cuenca de la Quebrada Chiguaza

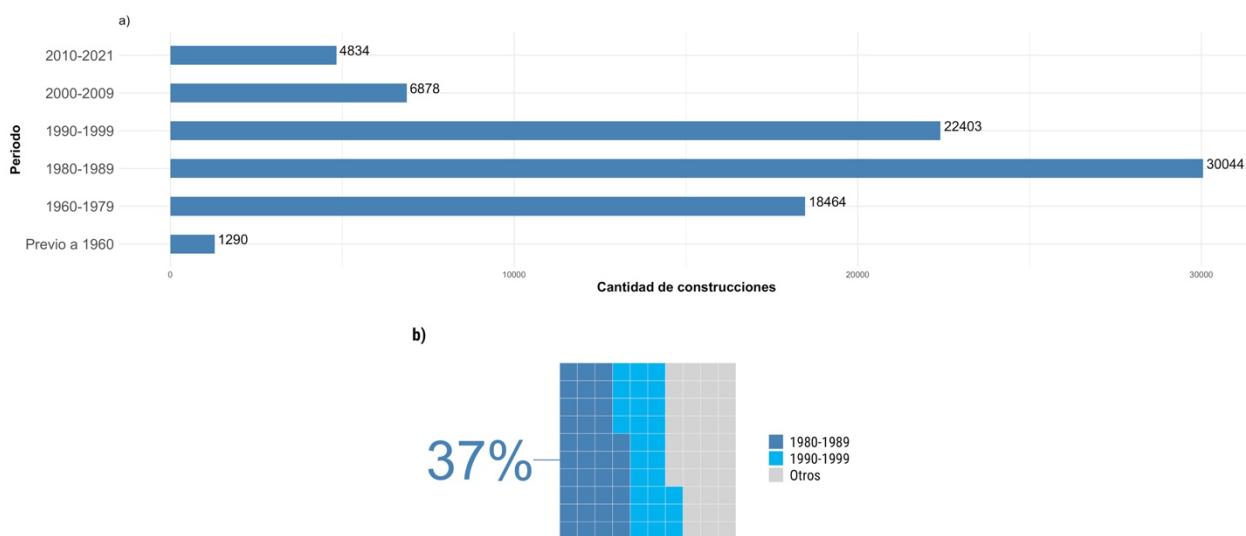


Fuente de la capa de barrios legalizados: Secretaría Distrital de Planeación (2019)

⁶ Corresponde a la capa de IDECA denominada Barrio Legalizado, definida como área geográfica resultante del procedimiento mediante el cual la Administración Distrital, reconoce aprueba planos, regulariza y expide la reglamentación, para los desarrollos humanos realizados clandestinamente, que sin perjuicio de lo dispuesto en el régimen de transición, a la fecha de expedición del Plan de Ordenamiento Territorial, cumplan con las condiciones exigidas por la normativa nacional. <https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/barrio-legalizado-bogota-dc>

La Figura 7 muestra la vetustez de las construcciones según la base de datos de predios de la UAECD actualizada a julio de 2021. Las construcciones más antiguas están localizadas en los barrios San Benito y Tunjuelito, que ocupan el área urbana localizada en la margen derecha de la quebrada Chiguaza en el tramo más aguas abajo hasta la confluencia con el río Tunjuelo. La mayoría de las viviendas de esta zona fueron construidas antes de 1970. En este periodo también se produjo ocupación de otras zonas de la cuenca, incluso llegando a generarse construcción en zonas cercanas a la cuenca alta. En la década de 1970-1980 ocurre densificación de las áreas ya ocupadas y una ocupación intensa de la cuenca media en la zona nororiental de la cuenca. En la década de 1980-1990 se produce la ocupación más dinámica representando el periodo en el cual se construyeron más viviendas en la cuenca (ver Figura 6). En esta década se ocupan amplias zonas de la cuenca media y la urbanización se extiende hacia el sur. De 1990 a 2000 las zonas urbanas se extienden más al sur y hacia la cuenca alta y también hacia la zona de Providencia Alta y Ciudad Bochica. Del año 2000 en adelante se produce una reducción de la velocidad de urbanización y la mayoría de las viviendas que datan de este periodo se ubican en zonas ya ocupadas.

Figura 6. Construcciones por año de construcción. a) número de construcciones por periodo; b) porcentaje de construcciones para los periodos de mayor dinámica de ocupación

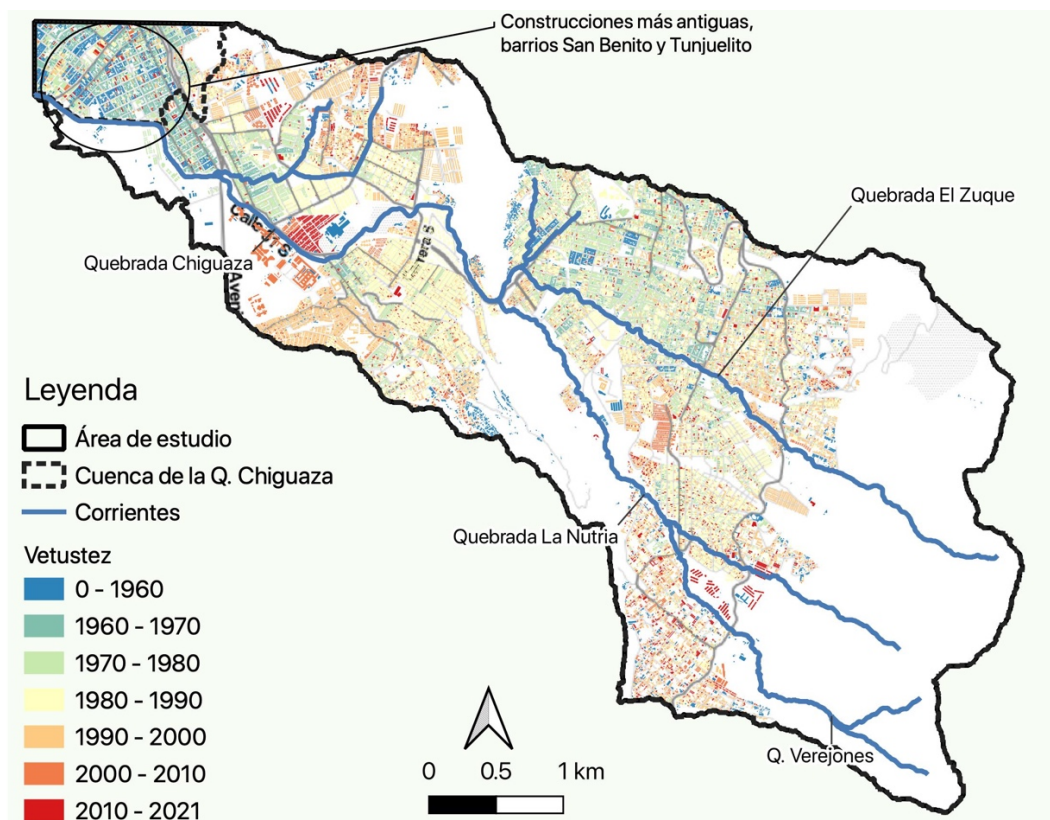


Fuente de datos: UAECD (2021)

La mayoría de las construcciones de la cuenca (91%) son de uso residencial. La Figura 8 muestra la clasificación de las construcciones según la categoría de uso de la UAECD, con 76,311 construcciones clasificadas por la UAECD como residenciales, le siguen en número las construcciones con uso comercial y de servicios (7%).

Las construcciones de uso comercial y de servicios se encuentran mezcladas con las de uso residencial, sin embargo, hay zonas en donde la densidad de comercio y servicios es mayor. La Figura 9 muestra la localización de construcciones con uso comercial y de servicios según la información de la base de datos de predios de la UAECD. La zona con mayor concentración de este tipo de uso corresponde al barrio Tunjuelito, que es el de mayor antigüedad localizado en el occidente de la cuenca (ver Foto 1). Otras zonas comerciales y de servicios están localizadas a lo largo de las vías principales, particularmente en la zona nororiental de la cuenca.

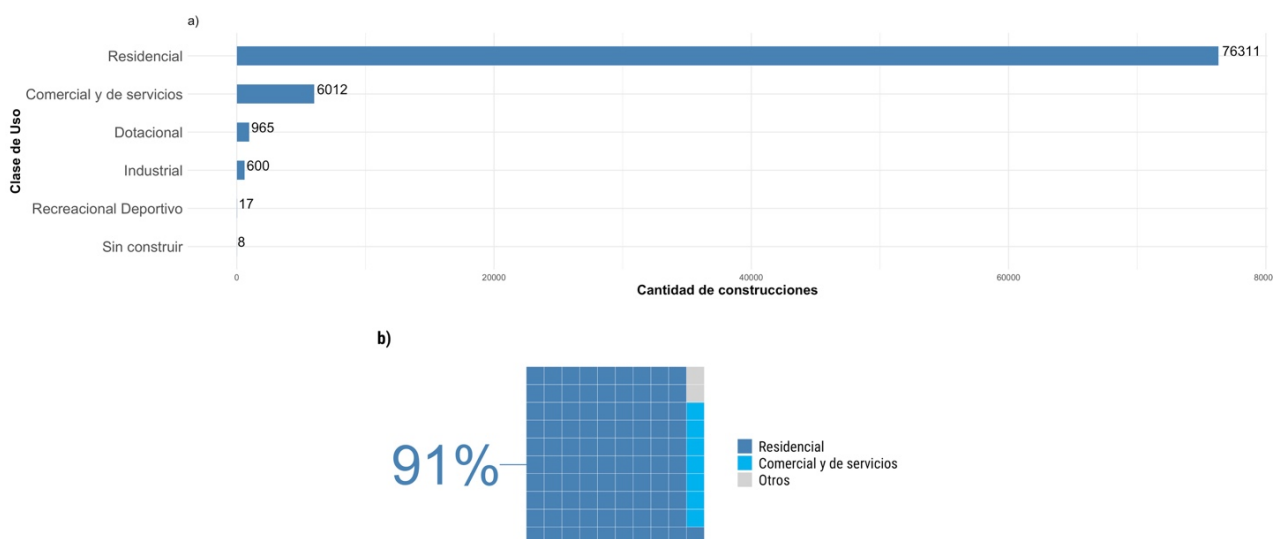
Figura 7. Vetustez de las construcciones



Fuente de datos: UAEDC (2021)

Nota: En la zona cercana a la desembocadura de la quebrada Chiguaza el área de estudio es mayor al área de la cuenca debido a que topográficamente esta zona no drena hacia la quebrada Chiguaza, pero si hace parte de las zonas afectadas por inundaciones.

Figura 8. Construcciones por categoría de uso. a) número de construcciones por tipo de uso; b) porcentaje de construcciones por tipo de uso



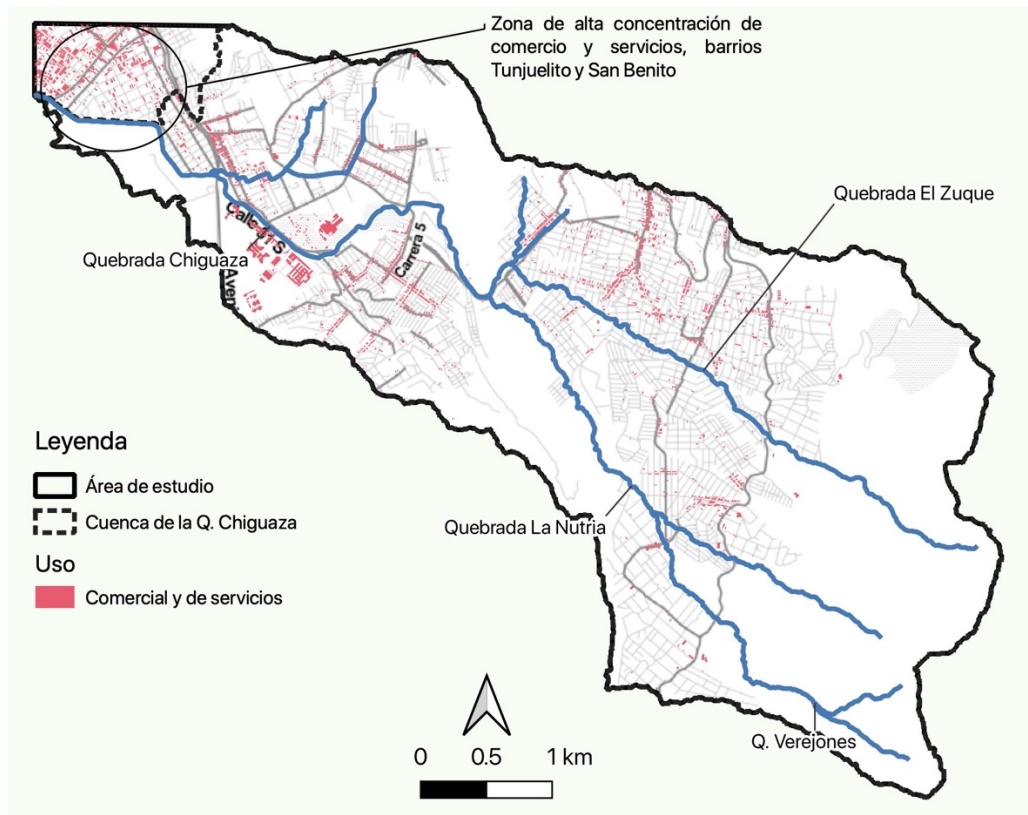
Fuente: UAEDC (2021)

Foto 1. Actividades comerciales en la zona de Tunjuelito



Fuente: Google Street View

Figura 9. Construcciones de uso comercial y de servicios en la cuenca de la quebrada Chiguaza



Fuente de datos: UAEC (2021)

Nota: En la zona cercana a la desembocadura de la quebrada Chiguaza el área de estudio es mayor al área de la cuenca debido a que topográficamente esta zona no drena hacia la quebrada Chiguaza, pero si hace parte de las zonas afectadas por inundaciones.

Como se evidencia en la Foto 2 las actividades comerciales formales se mezclan con un intenso comercio informal en las zonas de mayor concentración de actividades comerciales y de servicios.

Foto 2. Actividades comerciales formales e informales en la zona de Tunjuelito



Fuente: Google Street View

Comúnmente el primer piso de la construcción es utilizado para actividades comerciales mientras que el segundo y demás pisos se utilizan para uso residencial. Esto implica una fuerte relación entre la vivienda y los medios de vida de la población de la zona.

La localización de las construcciones de uso dotacional se muestra en la Figura 10. Este tipo de infraestructura se encuentra disperso en la cuenca. La mayoría de la infraestructura dotacional pertenece a la categoría 12 (Institucional Puntual)⁷ que corresponde a construcciones de tipo habitacional adaptado para fines institucionales (ver Tabla 1).

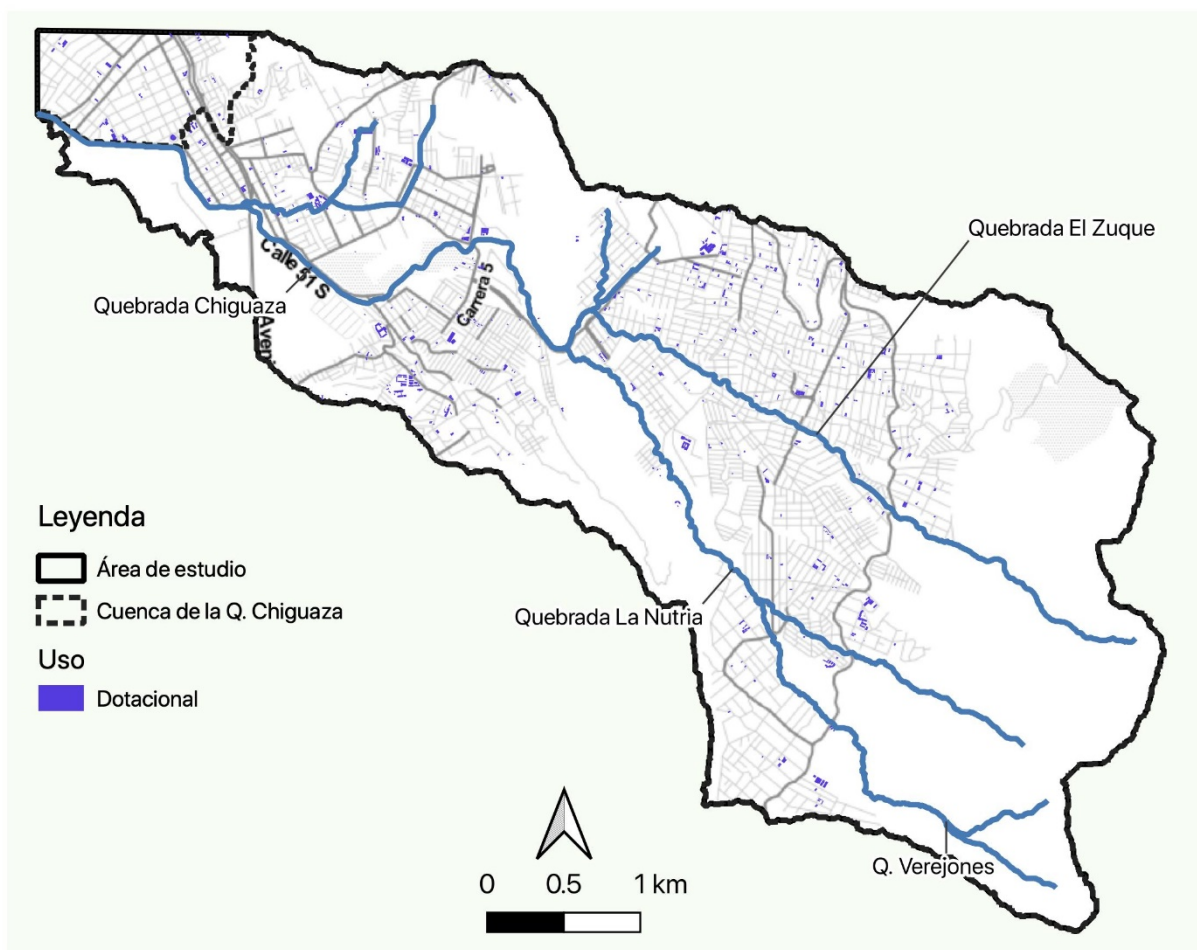
Tabla 1. Tipo de construcciones dotacionales en la cuenca de la quebrada Chiguaza

<i>Tipo</i>	<i>Código</i>	<i>Cantidad</i>
Institucional Puntual	12	465
Colegios y Universidades de 1 a 3 pisos	13	318
Colegios y Universidades de 4 pisos o más	16	69
Iglesias	14	41
Clínicas Hospitales Centro Médicos	17	30
Oficinas y Consultorios oficiales en NPH	15	20
Culto Religioso en NPH	58	20
Aulas de Clases	64	2

Fuente de datos: UAECD (2021)

⁷ <http://redatam.sdp.gov.co:8080/redcol/SDPDOC/FPREDIALDOC/Definiciones.pdf>

Figura 10. Construcciones de uso comercial y de servicios en la cuenca de la quebrada Chiguaza



Fuente de datos: UAECD (2021)

Nota: En la zona cercana a la desembocadura de la quebrada Chiguaza el área de estudio es mayor al área de la cuenca debido a que topográficamente esta zona no drena hacia la quebrada Chiguaza, pero si hace parte de las zonas afectadas por inundaciones.

Existen construcciones de uso industrial en una menor proporción que los usos anteriores, pero concentradas de una forma muy significativa en los barrios Tunjuelito y San Benito en el extremo occidental de la cuenca cerca de la zona de confluencia de la quebrada Chiguaza con el río Tunjuelo. Dentro de las actividades industriales pueden identificarse curtiembres, procesamiento de polietileno, procesamiento de plásticos, reciclaje, chatarrería, entre otros.

La Foto 3 corresponde a una de las vías en el barrio Tunjuelito en donde se concentra una alta actividad industrial. La foto muestra una curtiembre que constituye una de las actividades que tradicionalmente se han desarrollado en esta zona.

Figura 11. Construcciones de uso industrial en la cuenca de la quebrada Chiguaza



Fuente de datos: UAECD (2021)

Nota: En la zona cercana a la desembocadura de la quebrada Chiguaza el área de estudio es mayor al área de la cuenca debido a que topográficamente esta zona no drena hacia la quebrada Chiguaza, pero si hace parte de las zonas afectadas por inundaciones.

Foto 3. Actividades industriales en la zona de Tunjuelito

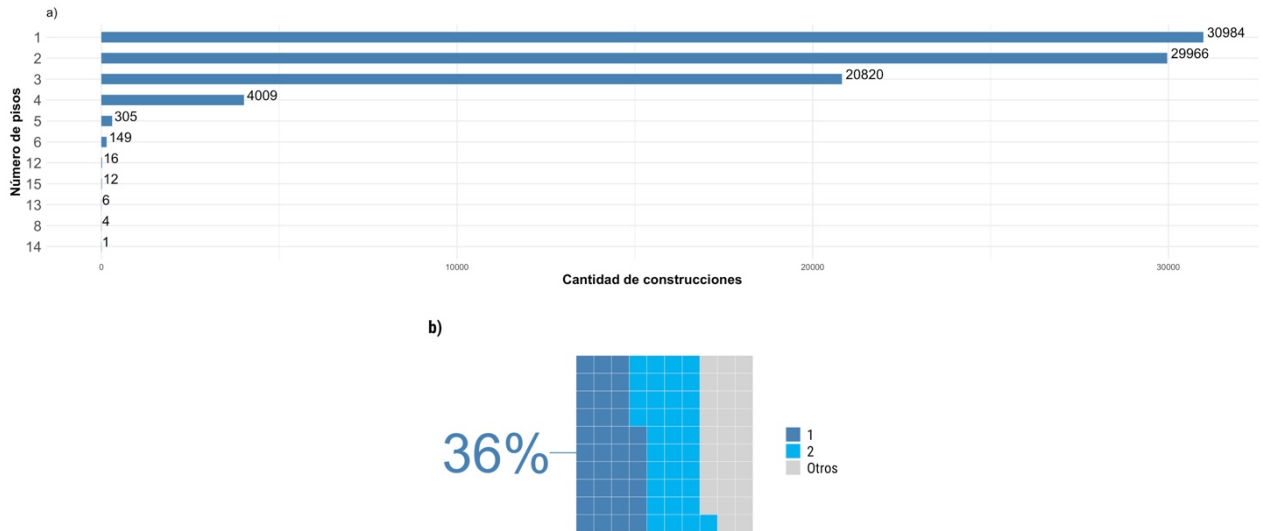


Fuente: Google Street View

Además, la base de datos de predios de la UAECD (2021) incluye tres predios de uso recreacional y deportivo que corresponden al polideportivo Molinos II, el parque recreativo y cultural La Victoria (CADE, Club y Escuela de Formación Deportiva y biblioteca pública) y CREA Entrenubes.

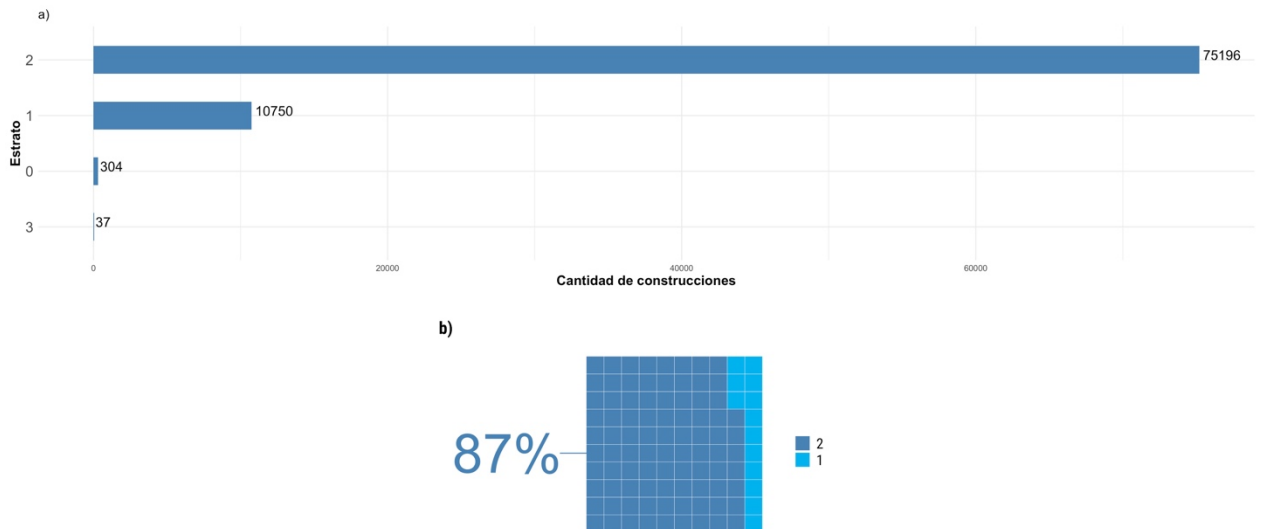
La mayoría de las construcciones son de 1 o 2 pisos (71%) con un 36% de viviendas de un solo piso. La cantidad de construcciones por número de pisos se muestra en la Figura 12, según la información de la capa de construcciones de la UAECD complementada con información fotointerpretada y de campo (IDIGER 2022a).

Figura 12. Cantidad de construcciones por categoría de número de pisos. a) número de construcciones por categoría de número de pisos; b) porcentaje de construcciones por categoría de número de pisos.



Fuente de datos: UAECD (2021)

Figura 13. Construcciones por estrato. a) número de construcciones por estrato; b) porcentaje de construcciones por estrato



Fuente de datos: UAECD (2021)

La mayoría de las construcciones (99%) son de estrato 1 o 2 con un 87% de viviendas en el estrato 2. La Figura 13 muestra el número de construcciones por estrato socio económico según la información de la UAECD complementada con fotointerpretación e información de campo.

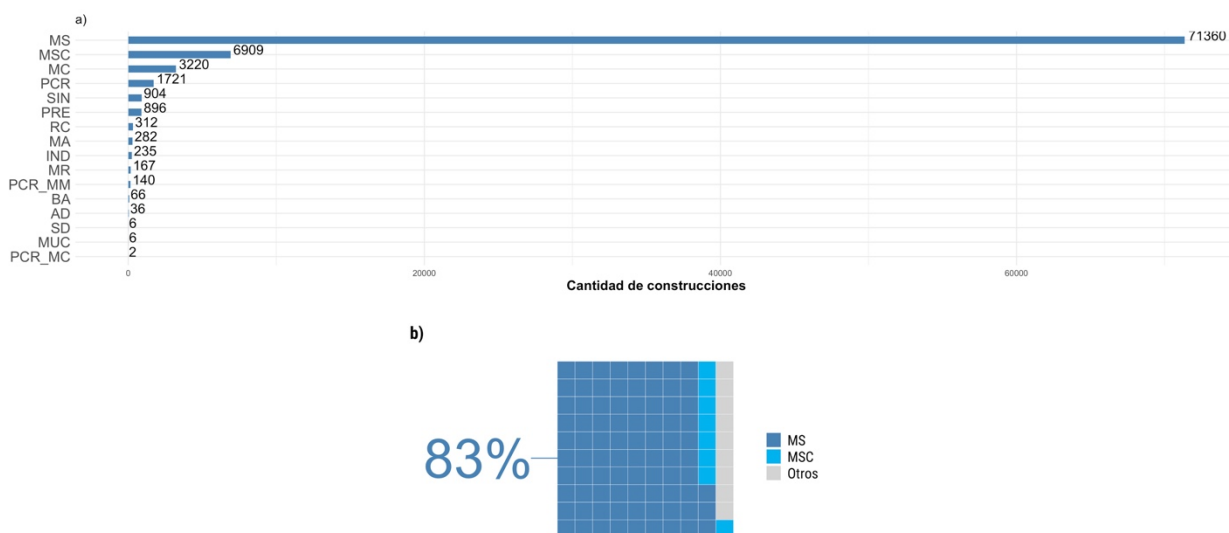
5. ASIGNACIÓN DE SISTEMA ESTRUCTURAL Y TIPOLOGÍA

El sistema estructural fue asignado para todas las construcciones de la cuenca que cuentan con información de la UAECD (83,907 construcciones de un total de 86,287) siguiendo la metodología descrita en la sección 3 y ANEXO A. De las 2,380 construcciones restantes 2,236 tienen características estructurales recopiladas por IDIGER en campo y 144 construcciones no tienen información ni de IDECA ni de campo, sin embargo, la mayoría de estas tiene tipología estructural asignada por el grupo de sismica para los estudios de riesgo sísmico de la ciudad. El procedimiento para asignar la tipología estructural a estas 144 construcciones consistió en una revisión de la fachada de la construcción con Google Street y comparación con la tipología estructural asignada para los análisis sísmicos. En caso de discrepancia, se tomó la información que visualmente se puede corroborar con Google Street.

Al aplicar el algoritmo de asignación de sistema estructural se encontraron construcciones con sistema dual y con muros de concreto. Estas categorías no tienen asignada una abreviatura por Prieto (2018) para la asignación de tipología estructural para análisis de riesgo sísmico. Para este análisis se utilizó la abreviatura SD para el sistema dual y MUC para los muros de concreto.

La cantidad de construcciones según tipo para todas las construcciones de la cuenca se muestra en la Figura 14. El 83% de las construcciones son de mampostería simple (MS) seguido de un 8% de construcciones en mampostería semiconfinada (MSC).

Figura 14. Cantidad de construcciones según tipo de sistema estructural. a) número de construcciones por sistema estructural; b) porcentaje de construcciones por sistema estructural



Nota: Las abreviaturas para los sistemas estructurales utilizados en la gráfica son los siguientes: mampostería simple (MS), mampostería semi confinada (MSC), mampostería confinada (MC), pórticos de concreto reforzado (PCR), sin sistema estructural (SIN), estructura prefabricada (PRE), reticular celado (RC), madera (MA), industrial (IND), mampostería reforzada (MR), pórticos de concreto con muros de mampostería (PCR_MM), bahareque (BA), adobe (AD), sistema dual (SD), muros de concreto (MUC) y pórticos de concreto con muros de concreto (PCR_MC)

La Foto 4 muestra un ejemplo del tipo de construcciones comúnmente encontrado en la cuenca.

Foto 4. Viviendas de la cuenca de la quebrada Chiguaza



Fuente: Google Street View

Una vez obtenido el sistema estructural para cada construcción, se generó un código tipológico siguiendo la metodología propuesta por Prieto (2018). Este código tipológico obedece a consideraciones de vulnerabilidad ante amenaza sísmica, sin embargo, ofrece el punto de partida para asignar grupos tipológicos para la evaluación de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales.

La tipología para riesgo sísmico contiene 4 grupos de letras, el primero indica la amenaza, el segundo el sistema estructural, el tercero el número de pisos y el cuarto el periodo constructivo. Por ejemplo, el código tipológico “S_MS_Np1_PC4” indica que el código es para amenaza sísmica, el sistema estructural es mampostería simple, de un solo piso y construida en el periodo 4 que corresponde a menos de 21 años de construida.

Las curvas de vulnerabilidad para inundaciones y avenidas torrenciales generalmente vinculan el material o sistema estructural de la vivienda y el número de pisos. El periodo constructivo, aunque es usado en algunas ocasiones (ver por ejemplo las curvas desarrolladas por Reese y Ramsay (2010)) dadas las grandes limitaciones que tiene la aplicación de estas curvas en Bogotá, el periodo constructivo no será utilizado (para una discusión de las limitaciones ver sección 9).

Al retirar el periodo constructivo de la tipología y considerar solo el sistema estructural y el número de pisos, se obtiene que el 67% de las construcciones en la cuenca pertenecen a dos grupos tipológicos (ver Figura 15 y Figura 16): (1) mampostería simple de un piso con el 33% de las construcciones y (2) mampostería simple de dos pisos con el 34%.

Figura 15. Porcentaje de construcciones por sistema estructural

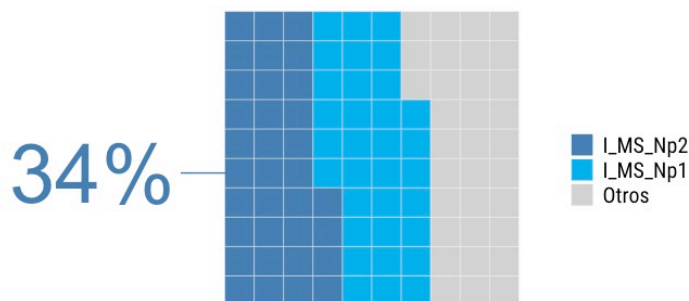
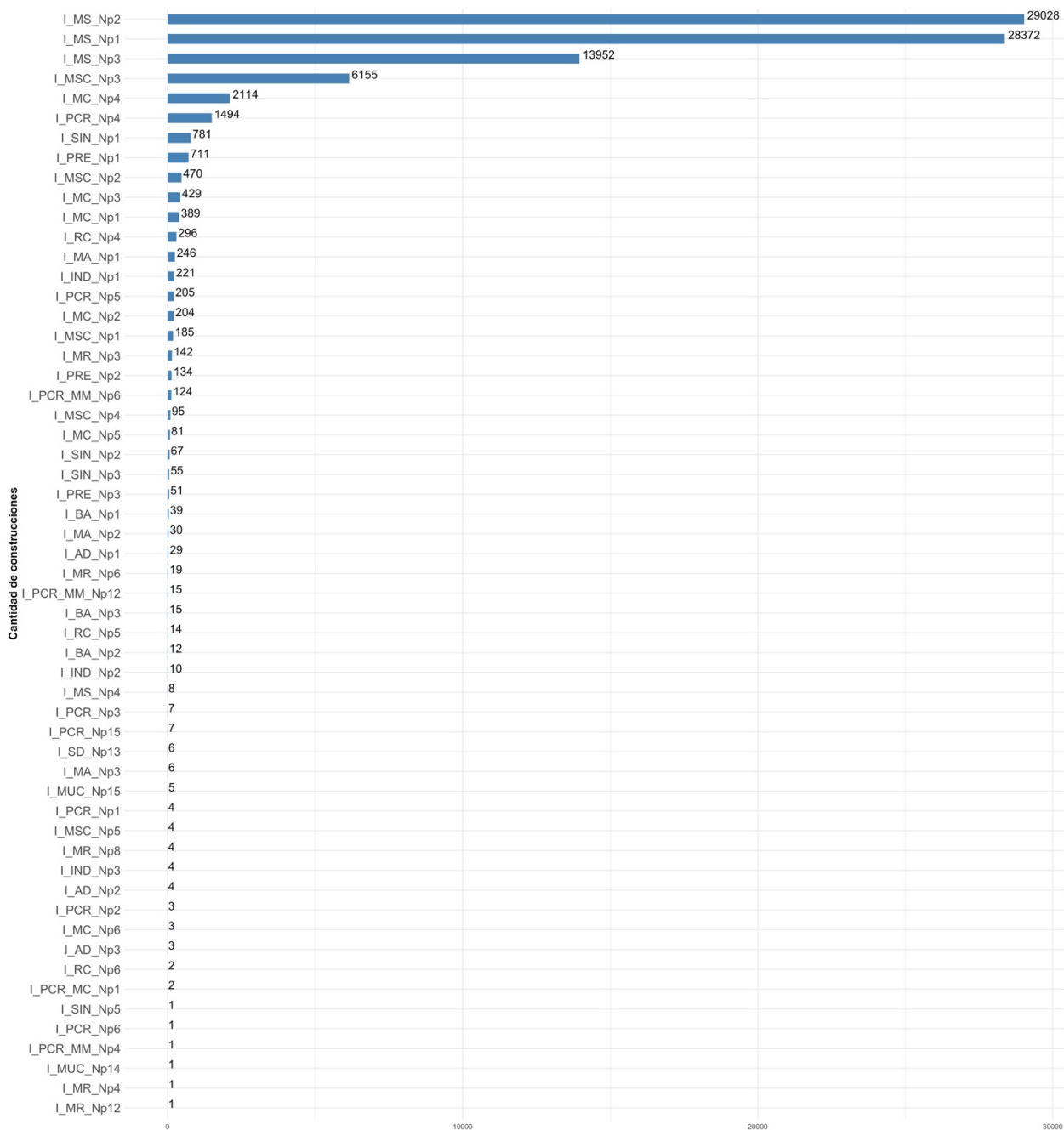


Figura 16. Cantidad de construcciones según tipo de sistema estructural

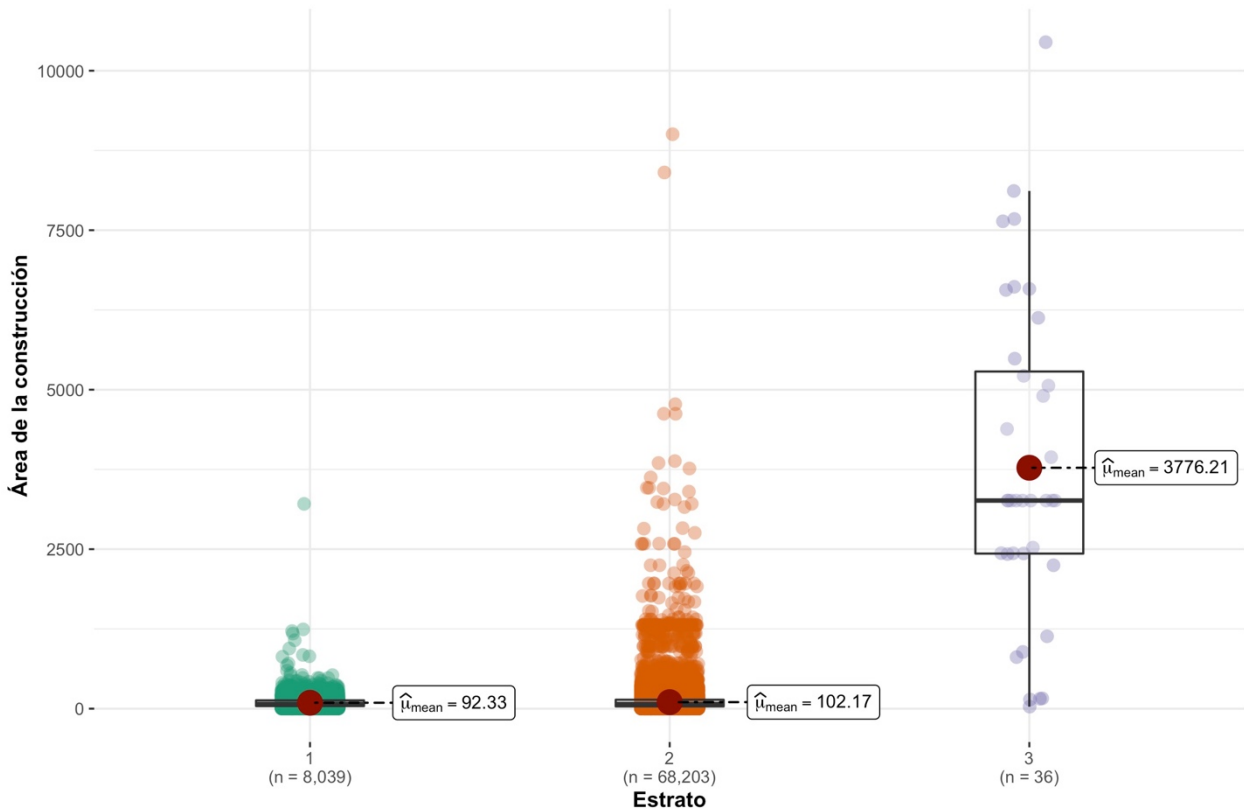


6. VALOR DE LAS CONSTRUCCIONES DE TIPO RESIDENCIAL

El valor de las construcciones de tipo residencial se obtuvo de la capa de avalúo comercial y catastral disponible en IDECA y generada por la UAECD cuya última actualización disponible para este análisis corresponde al 1 de enero de 2019. La información de UAECD está a nivel de manzana por lo cual, a las construcciones se les asignó el valor por metro cuadrado de las manzanas y según el área de la construcción, se obtuvo el valor total.

La Figura 17 muestra los diagramas de caja para el área de las construcciones según estrato. Dentro de la cuenca solo se identificaron 36 construcciones con uso residencial que tienen asignado el estrato 3, estas construcciones corresponden a conjuntos residenciales (Molinos del Milenio II, Portal de Molinos II, Conjunto Residencial Pasteur, Conjunto Residencial Portal de los Molinos I y II) que tienen áreas construidas con una media de 3,776 m² (ver Figura 17). Las construcciones de estrato 1 muestran un área promedio menor (μ_{mean}) que las de estrato 2.

Figura 17. Diagramas de caja del área construida de construcciones residenciales según estrato

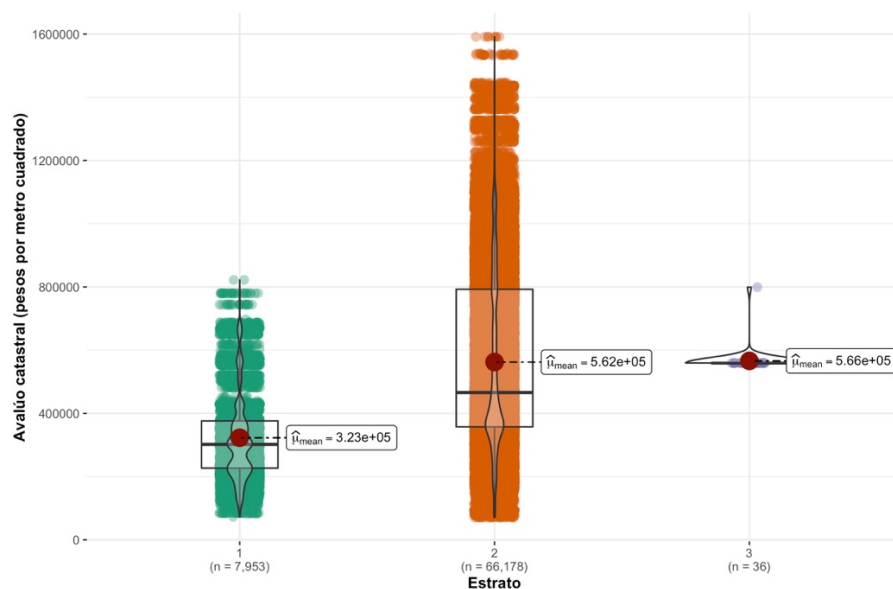


Fuente de datos: UAECD (2021)

Nota: El número de construcciones para los estratos 1, 2 y 3 es diferente al mostrado en la Figura 13 debido a que solo se están considerando las construcciones de uso residencial, mientras que la Figura 13 considera todas las construcciones existentes en la cuenca.

En el caso de las construcciones que no tienen datos de la UAECD (construcciones identificadas mediante interpretación de la ortofoto 2019 y no contenidas en la información disponible en IDECA), el valor del metro cuadrado se tomó como el valor promedio del estrato 1 (las construcciones nuevas son viviendas informales mayoritariamente). La Figura 18 y la Figura 19 muestran los diagramas de caja y de violín de la distribución de valores de avalúo catastral y comercial. Ambos valores se incluyeron en la base de datos de construcciones existentes en la cuenca.

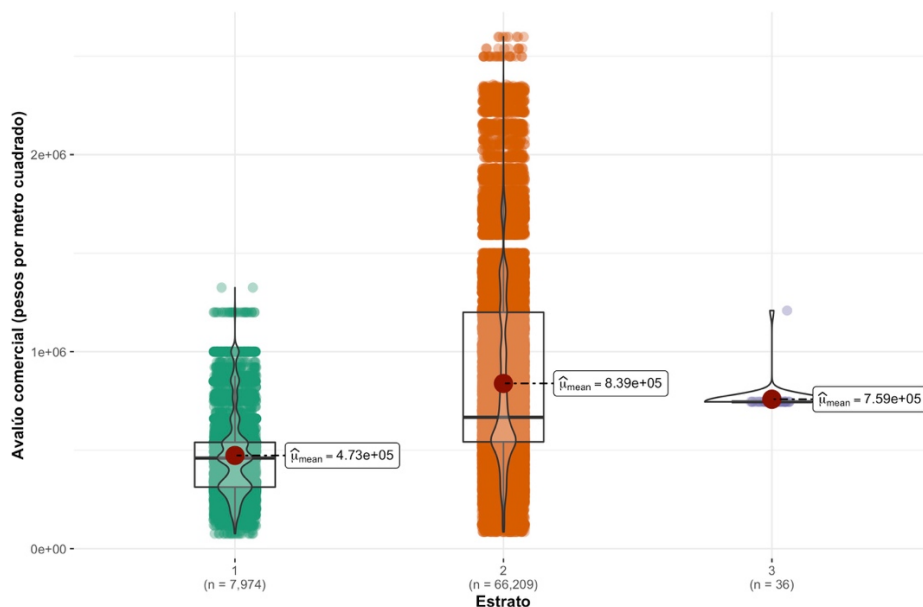
Figura 18. Diagramas de caja del avalúo catastral según estrato para viviendas en la cuenca de la quebrada Chiguaza



Fuente de datos: UAECD (2021)

Nota: El número de construcciones para los estratos 1 y 2 es diferente al mostrado en la Figura 17 debido a que existen construcciones que no se intersecan con los polígonos de manzanas del avalúo catastral y además los valores de avalúo catastral menores a 70,000 pesos se retiraron del análisis.

Figura 19. Diagramas de caja del avalúo comercial según estrato para viviendas en la cuenca de la quebrada Chiguaza



Fuente de datos: UAECD (2021)

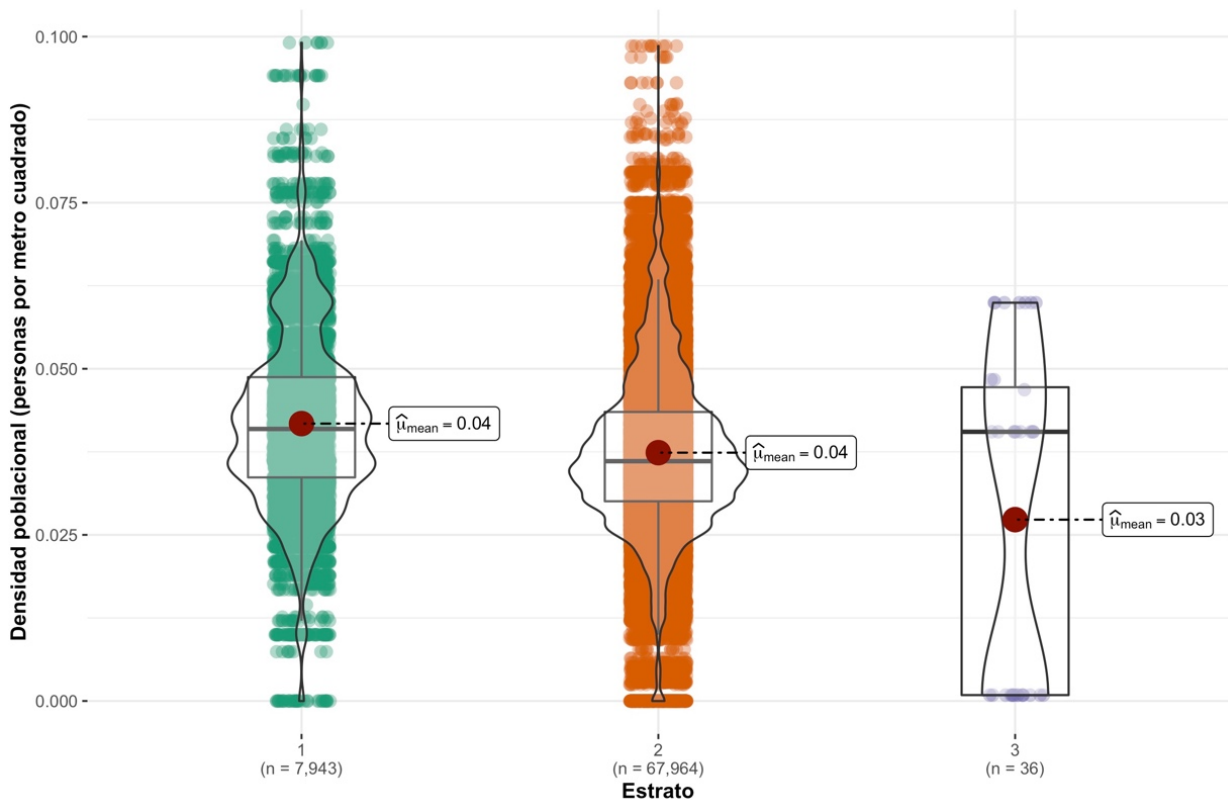
Nota: El número de construcciones para los estratos 1 y 2 es diferente al mostrado en la Figura 17 debido a que existen construcciones que no se intersecan con los polígonos de manzanas del avalúo comercial y además los valores de avalúo comercial menores a 70,000 pesos se retiraron del análisis.

Cabe mencionar que muchos estudios de riesgo utilizan como valor de los elementos expuestos el costo de reposición, otros utilizan el valor presente neto (ver por ejemplo, Wu y Guo (2021)) y otros utilizan el avalúo comercial (ver por ejemplo, (Arrighi *et al.*, 2020). Por ejemplo la USACE en Estados Unidos estima el valor de las estructuras como el costo de reemplazo depreciado (Marvi, 2020). En este análisis se ha utilizado el avalúo catastral y comercial en consistencia con la evaluación de riesgo de otras amenazas en Bogotá (el riesgo sísmico utiliza el avalúo catastral), pero se recomienda que a futuro se evalúe la posibilidad de utilizar el valor de reemplazo y se avance en una metodología para estimarlo.

7. POBLACIÓN

La población se obtuvo de la capa del censo 2018 del DANE⁸. La capa del DANE está disponible a nivel de manzana por lo cual se obtuvo la densidad por metro cuadrado en cada manzana y la población se asignó a cada construcción proporcional al área. Las densidades poblacionales son ligeramente menores en el estrato 3 (ver Figura 20). Para los estratos 1 y 2 la densidad promedio (μ_{mean}) es 0.04. Este valor se utilizó para estimar la población en las viviendas para las cuales no se tiene información del censo. Este enfoque resultó en un estimado de población para la cuenca de 300,307 personas (estimado en construcciones de tipo residencial).

Figura 20. Densidad poblacional por estrato



Fuente de datos: UAECD (2021) y DANE (2018)

⁸ https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/643/get_microdata

8. ARCHIVO SHAPE DE TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL, VALOR DE ELEMENTOS Y POBLACIÓN

De los resultados de las secciones anteriores se generó un archivo shape con los campos fundamentales para el análisis de riesgo: a) la tipología de la construcción; b) el valor de la construcción y c) población. Este archivo constituye la base de datos de exposición de construcciones residenciales de la cuenca de la quebrada Chiguaza, no solo para evaluaciones posteriores de riesgo por inundación y avenida torrencial sino para riesgo sísmico ya que no se limita a las construcciones localizadas en zonas de exposición a inundaciones, sino que cubre toda la cuenca.

La Tabla 2 muestra la estructura de la tabla de atributos del archivo shape generado para todas las construcciones existentes de la cuenca. Los primeros dos campos corresponden a los códigos completos de la construcción (CONCODIGO) y del lote (LOTICODE) según la UAEDC; posteriormente se muestran el número de pisos (CONNPIS); la abreviatura del sistema estructural (SEAbr); la tipología para amenaza sísmica (TypoSis) y para inundaciones (Typolnun); código de la manzana (COD_MAN_AV); avalúo comercial (AVALUO_COM) y catastral (AVALUO_CAT) por metro cuadrado; valores estimados catastral (VALFISca) y comercial (VALFISco); código de manzana del DANE (COD_DANE_A); población estimada (Pop); densidad poblacional de la manzana (Dens); estrato socio-económico (ESoEstrato) y grupo de uso (UsoClase).

Tabla 2. Tabla del archivo shape generado con las construcciones existentes en la cuenca de la quebrada Chiguaza

	CONCODIGO	LOTICODE	CONNPIS	SEAbr	TypoSis	Typolnun	COD_MAN_AV	AVALUO_COM	AVALUO_CAT	VALFISco	VALFISca	COD_DANE_A	Pop	Dens	ESoEstrato	UsoClase
1	00141906501...	001419065012	3	MS	S_MS_Np3_P...	L_MS_Np3	001419065	1622967.000...	1018605.000...	322935117.87...	202680230.5...	11001100000...	10.0...	0.0523207111...	2	Residencial
2	0013280360...	0013280360...	3	MSC	S_MSC_Np3_...	L_MSC_Np3	001328036	950000.000...	617500.000...	34204450.74...	22232892.98...	11001100000...	2.00...	0.044760054...	2	Residencial
3	0014270890...	001427089007	2	MS	S_MS_Np2_P...	L_MS_Np2	001427089	730908.000...	531695.000...	75519535.711...	54936270.42...	11001100000...	3.00...	0.031099249...	2	Residencial
4	00132102501...	001321025013	1	MS	S_MS_Np1_PC2	L_MS_Np1	001321025	720000.000...	470190.000...	56847864.5...	37124024.24...	11001100000...	3.00...	0.034594021...	2	Residencial
5	0013460130...	001346013031	1	PRE	S_PRE_Np1_P...	L_PRE_Np1	001346013	76643.00000...	60234.00000...	1527583.399...	1200533.101...	11001100000...	2.00...	0.094126890...	1	Residencial
6	0014200300...	0014200300...	3	MS	S_MS_Np3_P...	L_MS_Np3	001420030	850000.000...	569352.000...	156224078.3...	104642931.0...	11001100000...	9.00...	0.047590627...	1	Residencial
7	0014220190...	001422019045	3	MS	S_MS_Np3_P...	L_MS_Np3	001422019	1203055.000...	786460.000...	86669939.9...	56657792.84...	11001100000...	3.00...	0.042385316...	2	Residencial
8	0013280620...	0013280620...	3	MS	S_MS_Np3_P...	L_MS_Np3	001328062	635276.000...	425564.000...	125286424.4...	83927917.86...	11001100000...	6.00...	0.031927606...	2	Residencial
9	0013200160...	001320016023	3	MS	S_MS_Np3_P...	L_MS_Np3	001320016	550000.000...	364016.000...	34673424.34...	22948511.33...	11001100000...	2.00...	0.035277981...	2	Residencial
10	0025100120...	002510012009	1	MS	S_MS_Np1_P...	L_MS_Np1	002510012	540000.000...	360229.000...	18790897.99...	12535234.06...	11001100000...	1.00...	0.031328949...	1	Residencial
11	00131500401...	001315004016	2	MS	S_MS_Np2_P...	L_MS_Np2	001315004	476747.000...	309885.000...	14094802.27...	9161605.2171...	11001100000...	1.00...	0.030989495...	2	Residencial
12	0025100970...	002510097005	3	MSC	S_MSC_Np3_...	L_MSC_Np3	002510097	540000.000...	378206.000...	111953503.3...	78410160.54...	11001100000...	6.00...	0.028287970...	1	Residencial
13	0014150820...	001415082003	2	MS	S_MS_Np2_P...	L_MS_Np2	001415082	1300000.000...	845000.000...	166815479.2...	108430061.4...	11001100000...	3.00...	0.021619017...	2	Residencial
14	00132801401...	001328014013	3	MS	S_MS_Np3_P...	L_MS_Np3	001328014	622709.000...	426113.000...	165024119.0...	112924210.8...	11001100000...	9.00...	0.033254745...	2	Residencial
15	00141803801...	001418038015	2	MS	S_MS_Np2_P...	L_MS_Np2	001418038	1729491.000...	1072595.000...	60568214.86...	37563169.98...	11001100000...	2.00...	0.049877632...	2	Residencial
16	0013520440...	0013520440...	1	MS	S_MS_Np1_P...	L_MS_Np1	001352044	900000.000...	585000.000...	33604996.8...	21843247.92...	11001100000...	2.00...	0.053695330...	2	Residencial
17	00132102100...	001321021008	1	MS	S_MS_Np1_PC2	L_MS_Np1	001321021	720000.000...	500588.000...	28870958.67...	20072854.80...	11001100000...	1.00...	0.020412893...	2	Residencial
18	00131506401...	001315064010	1	MS	S_MS_Np1_P...	L_MS_Np1	001315064	550000.000...	371785.000...	63157315.59...	42692622.86...	11001100000...	3.00...	0.026919089...	2	Residencial
19	0013300560...	0013300560...	3	MS	S_MS_Np3_P...	L_MS_Np3	001330056	870000.000...	570948.000...	79696574.17...	52301838.65...	11001100000...	3.00...	0.036543142...	2	Residencial

9. VULNERABILIDAD

9.1 CURVAS DE VULNERABILIDAD

Existen pocos estudios que describen la vulnerabilidad de elementos expuestos ante impactos generados por inundaciones súbitas y flujos en el rango de la hiperconcentración y los flujos de detritos (Thouret *et al.*, 2014). Particularmente, hay una gran escasez de información en el medio colombiano. Generalmente, las curvas se obtienen de recopilación de datos en campo luego de que ocurre un evento, permitiendo construir la relación entre el daño de la estructura y la magnitud de la amenaza. Sin embargo, la extrapolación de estos métodos y criterios para permitir la evaluación de la vulnerabilidad física en un área diferente donde no hay registros introduce una alta incertidumbre en el análisis (Thouret *et al.*, 2014). En general las curvas de vulnerabilidad son específicas para cada sitio y no son siempre transferibles (Fuchs *et al.* 2019; Cammerer *et al.* 2013).

Además de la limitación en número de estudios existentes, también existen limitaciones en cuanto a que (Fuchs *et al.*, 2019): i) algunos estudios no describen con suficiente detalle el tipo de construcciones para las cuales se desarrollan las curvas, lo que hace que las curvas propuestas no sean aplicables (por ejemplo, Azmeri e Isa 2018b; Zhang *et al.* 2018); ii) los métodos de cálculo de las curvas difieren de un estudio a otro; y iii) algunos métodos agregan resultados de construcciones con diferente número de pisos. Muchos de los estudios utilizan como parámetro de intensidad la profundidad de flujo sin incluir la velocidad o un parámetro de impacto (Fuchs *et al.* 2019; Marvi 2020; Cammerer *et al.* 2013) lo que podría hacer que la curva sea más difícil de aplicar a otras áreas donde las velocidades que se desarrollan en el evento son diferentes a las que se alcanzan en el área donde se desarrolló la curva (Malgwi, Fuchs and Keiler, 2020). Sin embargo, vale pena resaltar que la mayoría de curvas de vulnerabilidad para inundaciones (tanto lentas como súbitas) y flujos de detritos utilizan la profundidad del flujo como único parámetro de intensidad de la curva de vulnerabilidad (Fuchs *et al.* 2019; Eidsvig *et al.* 2014).

Según Romali *et al.* (2015) los daños resultantes de una inundación súbita o avenida torrencial dependen de las características de la inundación incluyendo: profundidad del agua, velocidad, duración, contenido de sedimentos, área cubierta por la inundación, existencia de sistema de alerta. Debido a que en la quebrada Chiguaza no existe un sistema de alerta específico para la cuenca, este aspecto no será considerado. En cuanto al contenido de sedimentos, este es un aspecto a ser evaluado dentro de los análisis de amenaza, por lo cual para efectos de la revisión de literatura de esta sección se asumirá que el rango de tipos de flujo que pueden ocurrir va desde el flujo de agua clara hasta los flujos de detritos.

Para identificar curvas de vulnerabilidad aplicables al caso de la quebrada Chiguaza, se realizó una revisión literatura y de bases de datos de curvas de vulnerabilidad disponibles.

En la revisión de curvas de vulnerabilidad para amenazas torrenciales llevada a cabo por Fuchs *et al.* (2019) se observa que la mayoría de las curvas han sido desarrolladas para construcciones en países europeos, cuyas características difieren significativamente del tipo de construcciones en la cuenca de la quebrada Chiguaza. Lo *et al.* (2012) desarrollaron curvas de vulnerabilidad para viviendas de un piso de mampostería con columnas con concreto reforzado y mampostería simple en Taiwan para flujos de detritos. Las curvas de vulnerabilidad desarrolladas por Lo *et al.* (2012) se muestran en el ANEXO B y serán consideradas como una alternativa para la cuenca de la quebrada Chiguaza en caso de que existan áreas de la cuenca en donde se puedan presentar flujos de detritos.

Prieto et al. (2018) desarrolló una curva de fragilidad⁹ para edificaciones de mampostería simple que validó en Colombia. La curva usa como parámetro de intensidad el producto de la profundidad por la velocidad al cuadrado, y considera solamente el daño total (ver ANEXO B).

En Latinoamérica se han adelantado esfuerzos para construir curvas de daño para inundaciones. Pero principalmente han estado asociadas a inundaciones lentas. Por ejemplo, en el contexto de México, Salas (2011) presenta curvas de vulnerabilidad a inundaciones lentas por tipología de viviendas mexicanas con base en la profundidad de flujo. Sin embargo, no se presenta información sobre la metodología utilizada para construirlas.

En Nueva Zelanda el proyecto Riskscape (Reese y Ramsay 2010) generó curvas de vulnerabilidad para varios tipos constructivos. Las construcciones en mampostería en Nueva Zelanda generalmente tienen un pórtico en madera por lo cual a pesar de ser viviendas de mampostería son muy poco resistentes a las inundaciones. Aunque los métodos constructivos son diferentes, las curvas de vulnerabilidad desarrolladas en Nueva Zelanda para viviendas en mampostería se compilaron para potencialmente ser utilizadas para describir la vulnerabilidad de viviendas de mampostería simple. Una de las ventajas de las curvas desarrolladas en Nueva Zelanda es que son de las pocas existentes en la literatura que consideran la velocidad del flujo junto con la profundidad como parámetros de la curva y están disponibles para 1 y 2 pisos. El proyecto Riskscape también generó curvas para viviendas en concreto y mampostería reforzada, estas también fueron compiladas (ver ANEXO B), aunque en la cuenca existen muy pocas viviendas de este tipo.

Mason et al. (2010) desarrollaron curvas para Australia considerando diferentes sistemas estructurales comúnmente usados en ese país y estudiaron la influencia de la velocidad en el daño de las construcciones. Sin embargo, los métodos constructivos y sistemas estructurales son significativamente diferentes a los utilizados en Bogotá en la cuenca de la Quebrada Chiguaza.

La plataforma CAPRA ofrece una base de datos de curvas de vulnerabilidad (www.ecapra.org). Las curvas de inundaciones están definidas con un único parámetro correspondiente a la profundidad de flujo con parámetros ajustables para definir la curva. De la revisión de literatura del uso de las curvas de la plataforma CAPRA, Ordaz et al. (2013) muestran las curvas usadas por Jaimes et al. (2011) para viviendas de materiales débiles (no se especifica que tipo de materiales) de dos pisos con cubierta ligera. Sin embargo, las curvas presentadas en ese estudio muestran niveles de daño muy bajos en comparación con otras curvas desarrolladas incluso para viviendas más resistentes. Para el estudio de riesgo por inundación en la cuenca del río Tocumen en la ciudad de Panamá, JBA (2019) utilizó las curvas disponibles en la base de datos de CAPRA. Las tipologías estructurales de este estudio incluyeron viviendas de mampostería de 1 y 2 pisos, edificaciones en madera de 1 y 2 pisos y edificaciones de tierra de 1 y 2 pisos. Una de las limitaciones del estudio fue que las curvas se extrajeron de la base de datos de CAPRA sin que hubieran sido desarrolladas para el sitio del proyecto, sin embargo, se utilizaron como una primera aproximación y considerando que fueron las más aplicables de las existentes en la literatura. Estas curvas se encuentran compiladas en el ANEXO B.

Huizinga et al. (2017) desarrollaron una base de datos global de curvas de vulnerabilidad ante inundaciones. Los datos usados para el desarrollo de las curvas comprenden inundaciones

⁹ Las funciones de fragilidad describen la probabilidad de exceder un umbral de estado de daño en un rango de valores de intensidad de la amenaza para una determinada tipología estructural (Prieto *et al.*, 2018) (Nofal, van de Lindt and Do, 2020).

fluviales y costeras, pero no están asociadas a un tipo específico de inundación por lo cual los autores recomiendan el uso de estas curvas solo para un primer análisis de un evento genérico de inundaciones.

Para el estudio de inundaciones súbitas y avenida torrencial de la cuenca alta del río San Cristóbal, la UNAL (2006) desarrolló modelos en ETABS de estructuras de pórtico en concreto de dos pisos, mampostería no confinada de un piso, sistemas en mampostería de dos pisos, estructuras en madera de un piso y estructuras prefabricadas de un piso. Los modelos incluyeron las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas para un rango de concentraciones de flujo. Sin embargo, la UNAL (2006) concluyó de las modelaciones que la diferencia entre densidades era insignificante por lo cual sus resultados finales corresponden a las modelaciones únicamente con agua. Esta conclusión es consistente con los análisis de Totschnig y Fuchs (2013) que encontraron en torrentes en Austria que el tipo de proceso geomorfológico (transporte fluvial de sedimentos y flujo de detritos) tuvo poca influencia en las curvas de daño para residencias y alojamientos turísticos y tampoco encontraron diferencias significativas en las curvas de daño de los dos tipos de construcciones por lo cual recomendaron utilizar una sola curva para los dos tipos de proceso torrencial (transporte fluvial de sedimentos y flujo de detritos) y los dos tipos de construcciones, utilizando como parámetro de intensidad la profundidad del depósito. Totschnig y Fuchs (2013) concluyeron que no hay necesidad de distinguir entre los diferentes procesos torrenciales con carga de sedimentos cuando se evalúa la vulnerabilidad física de construcciones residenciales con la salvedad de que esta distinción si es necesaria para el desarrollo de medidas de mitigación y la evaluación de vulnerabilidad de otro tipo de infraestructura y personas.

Las curvas de vulnerabilidad presentadas por UNAL (2006) fueron obtenidas utilizando las derivas de la estructura generada por la presión hidrodinámica e hidrostática como dato de entrada para las curvas de Periodo de la Estructura (T_a) vs deriva. Estas curvas son las únicas identificadas de la revisión de literatura para la ciudad de Bogotá ante inundaciones súbitas y avenida torrencial y fueron compiladas en el ANEXO B. Sin embargo, es importante mencionar que estas curvas tienen grandes limitaciones debido a que los daños que producen las inundaciones no solamente se generan por el desplazamiento de la estructura, sino que diferencias de altura de agua entre el exterior y el interior de las viviendas es una causa común de la falla de las estructuras¹⁰ y los daños también pueden producirse por el contacto de los materiales con el agua (HNFMSSC, 2006). De otro lado los daños en el interior ocurren a pesar de que no se produzcan daños en la estructura.

Idealmente, no solo las características físicas de la construcción deben tenerse en cuenta sino también los contenidos. Sin embargo, contar con información específica de los contenidos para cada construcción tiene limitaciones. La única forma de obtener ese nivel de datos es a través de obtener los datos de campo para cada construcción individualmente, lo que es demasiado costoso para áreas grandes. Por lo tanto, generalmente la información disponible se limita a la información básica de la construcción. Las aproximaciones al daño de contenidos que se presentan en la literatura se basan en suposiciones sobre el tipo de contenidos de la vivienda y en el caso de viviendas de dos o más pisos en la dependencia del daño de los contenidos del

¹⁰ La USACE ha mostrado ejemplos de cómo se requieren diferencias de nivel de flujo pequeñas (0.57-1 m) entre el interior y el exterior de viviendas para que se produzca la falla de muros de concreto. Otros autores han sugerido rangos de entre 0.8 y 2m de diferencia para que se produzca la falla de los muros (Mason *et al.*, 2010).

área disponible en los pisos superiores y de la distribución de los contenidos en los diferentes pisos (Reese y Ramsay 2010). Baró-Suárez et al. (2011) generaron una base de datos para zonas habitacionales de México con el número de bienes existentes dentro de las viviendas, incluyendo electrodomésticos, automóviles, computadores, mobiliarios y ropa y definieron los contenidos para una vivienda tipo, su valor monetario y el porcentaje de afectación de los bienes en función de la profundidad de flujo. Para las viviendas con el índice de marginación más alto (condiciones de pobreza más alto) el porcentaje de afectación estimado por Baró-Suárez et al. (2011) se muestra en la Tabla 3. Este tipo de ejercicio es necesario en Bogotá para estimar los daños a los contenidos, sin embargo, el análisis presentado en este reporte no tiene alcance para generar este tipo de información.

Ante la falta de información, algunos autores han utilizado un porcentaje o tasa de daño de los contenidos con respecto a los daños en la estructura. En ciudad de Panamá por ejemplo, JBA (2019) utilizó la proporción entre el daño de la estructura y el daño a contenidos propuesta por el Manual Multicolor de Reino Unido - Multi-Coloured Manual (Flood Hazard Research Centre, 2010) ajustado, considerando que no hay daños a contenidos por debajo de una profundidad de 0.1 m. Esto para tener en cuenta que en Panamá no hay alfombrado de las viviendas, que es uno de los aspectos que genera daños a poca profundidad. Esta es la misma situación de las viviendas en la quebrada Chiguaza, por lo que ante la poca disponibilidad de datos se propone como alternativa utilizar el ajuste propuesto por JBA (2019) mostrado en la Tabla 4.

Tabla 3. Porcentaje de afectación por inundación de una vivienda localizada en una zona de índice de marginación muy alto

IM muy alto	Altura de lámina de agua (m)						
	0.10	0.20	0.30	0.50	0.70	1.00	2.50
Bienes en la vivienda							
Radio o radiograbadora			90	100	100	100	100
TV			90	100	100	100	100
Videocasetera			90	100	100	100	100
Licuada			90	100	100	100	100
Refrigerador		70	80	90	100	100	100
Lavadora		70	80	90	100	100	100
Teléfono						100	100
Bóiler					90	100	100
Automóvil		10	20	50	60	70	100
Computadora		50	60	70	90	100	100
Estufa				90	100	100	100
Sala-comedor	10	30	50	80	100	100	100
Recámaras-colchón			90	100	100	100	100
Ropa			50	100	100	100	100

Fuente de datos: Baró-Suárez et al. (2011)

Tabla 4. Tasa de daños a contenidos/daños a la estructura en función de la profundidad

Profundidad (m)	Tasa de daño a contenidos/ Daños a la estructura
0.1	0
0.2	0.93
0.3	0.77
0.6	0.72
0.9	0.71
1.2	0.64
1.5	0.59
1.8	0.59
2.1	0.54
2.4	0.50
2.7	0.43
3	0.40

Fuente de datos: JBA, (2019)

Las curvas de vulnerabilidad compiladas se presentan en el ANEXO B. Se recomienda que durante el análisis de riesgo se utilice no una sino la mayor cantidad de curvas posible de las compiladas en este informe y se evalúe la sensibilidad de los resultados de riesgo.

9.2 VULNERABILIDAD DE LAS PERSONAS

Existen pocos estudios sobre la mortalidad y la tasa de heridos para inundaciones. Algunos estudios indican que la mayoría de las muertes causadas por inundaciones ocurren por ahogamiento y muchas de ellas ocurren en vehículos cuando las personas conducen en las vías inundadas (Reese and Ramsay, 2010). Sin embargo, hay muy poca información sobre las muertes causadas por enfermedades generadas por las inundaciones. Los factores que afectan la pérdida de vidas o el número de heridos y su modelamiento son extremadamente complejos. Debido a la falta de información de la vulnerabilidad de las personas, el análisis de riesgo por inundación y avenidas torrenciales en la quebrada Chiguaza se limitará a estimar la exposición de personas sin llegar a estimaciones de muertes o heridos. Se recomienda que este paso se adopte en el futuro cuando se cuente con mayor información y puedan desarrollarse modelos de riesgo para la vida de las personas ante este tipo de amenazas.

9.3 INDICADOR DE VULNERABILIDAD FÍSICA

La vulnerabilidad física ha sido identificada como el origen para las otras dimensiones de la vulnerabilidad (Malgwi, Fuchs y Keiler, 2020). Sin embargo, como se mencionó en las secciones anteriores, la falta de datos sobre el daño esperado según la intensidad de las inundaciones en la zona de estudio es un factor que introduce un alto nivel de incertidumbre. Bajo estas condiciones, varios autores han planteado que el uso de grados de daño cualitativos e indicadores podría ser más adecuado para los análisis de vulnerabilidad ya que no dependen de información sobre daños en términos económicos.

El uso de indicadores se enfoca en identificar y entender los factores principales que contribuyen a la configuración de la vulnerabilidad. Este tipo de enfoque permite un análisis integrado y puede extenderse al análisis multiamenaza y es particularmente útil en áreas donde no existe información de daños o esta es muy limitada (Godfrey *et al.*, 2015).

Para seleccionar las variables para la construcción de indicadores, se realizó una revisión de literatura y se identificaron aquellas que han sido reportadas como relevantes en la definición de la vulnerabilidad física de construcciones ante inundaciones y avenidas torrenciales. Un requerimiento adicional es que todas las variables deben estar disponibles para cada construcción de la cuenca.

Dentro de los indicadores reportados por varios autores para evaluar la vulnerabilidad física se encuentran: aplicación de códigos constructivos, sistema de transporte, material del techo, material de muros y piso, posición de la construcción en relación con el nivel de la calle, proporción de espacios verdes por edificio, tipo de edificación, uso de la edificación, condición de la edificación (considerando edad y mantenimiento), material constructivo, número de pisos, heterogeneidad de la manzana (usando tamaño de la edificación y uso), forma de la manzana, densidad de construcciones, elongación de la construcción (alto/ancho), compacidad, proximidad, presencia de sótanos, número de aberturas, calidad de la construcción y cobertura del suelo alrededor de la construcción (Malgwi, Fuchs and Keiler, 2020).

Godfrey et al. (2015) compararon varios indicadores e identificaron su relevancia para diferentes amenazas incluyendo inundaciones súbitas y flujos de detritos, el resultado de esta comparación se muestra en la Tabla 5, complementado con un ejercicio similar desarrollado por Kappes et al. (2012).

Tabla 5. Comparación de relevancia de indicadores según amenaza

Indicador de vulnerabilidad física	Inundación fluvial	Inundación súbita	Deslizamientos	Flujos de detritos
Altura de la construcción	A	A	B	M
Número de pisos	A	A	B	M
Numero de ventanas y puertas	A	A	-	A
Puertas y ventanas en la dirección de la ladera	A	M	M	A
Altura de puerta o ventana más baja	A	M	-	M
Tamaño de la construcción	L	M	M	M
Sistema estructural	M	M	A	A
Tipo de cimentación	B	B	A	M
Profundidad de la cimentación	B	M	A	M
Material de muros	M	A	M	A
Calidad de la construcción	M	A	M	A
Mantenimiento	B	M	M	M
Presencia de sótano*	A	A	B	M
Grietas en la estructura	B	M	H	M
Muro alrededor de la construcción*	A	A	M	M
Localización en ladera*	-	B	A	M
Localización cerca de una ladera*	M	B	M	A
Construcciones entre otras construcciones	-	A	B	A

Fuente: Godfrey et al. (2015) y Kappes et al. (2012). En azul oscuro se encuentran resaltados los indicadores disponibles y con alta importancia (A) para el análisis de inundación súbita y flujos de detritos, en azul más claro se encuentran los indicadores de importancia media (M). La letra B corresponde a la categoría de baja importancia.

Los indicadores en negrilla en la Tabla 5, son los que se encuentran disponibles para la cuenca de la quebrada Chiguaza. Los indicadores que tienen un asterisco corresponden a aquellos que se encuentran disponibles pero que no se consideran relevantes para el análisis:

- Sótanos: en la cuenca no hay edificaciones con sótanos;
- Muros alrededor de las construcciones: esta información no está disponible de las bases de datos, sin embargo, de Google Street View es posible concluir que no es común en la cuenca que existan muros alrededor de las construcciones;
- Localización en ladera o cerca de una ladera: este es un factor que se considera en la evaluación de amenaza a través de la simulación bidimensional del flujo en toda la cuenca;
- Altura de la construcción: al tomar como indicador el número de pisos no se considera necesario incluir también la altura de la construcción.

Un factor importante tanto para inundaciones súbitas como para flujos de detritos es el número de ventanas y puertas, ya que una construcción es más susceptible al daño y pérdidas si tiene puertas y ventanas localizadas en la dirección opuesta al flujo (Godfrey *et al.*, 2015), sin embargo, esta información no está disponible, lo mismo que la calidad de la construcción. Vale la pena mencionar que la calidad constructiva es una variable que se reconoce en la literatura como de gran importancia ya que el estado de la construcción es esencial para su integridad y estabilidad tanto frente a inundaciones como a procesos de remoción en masa (Godfrey *et al.* 2015; Totschnig y Fuchs 2013), por lo cual a futuro —cuando se cuente con la información— debería integrarse al análisis.

Ettinger *et al.* (2016) encontraron que la densidad de construcciones es una variable importante ya que densidades bajas implican que existen espacios entre las construcciones lo que crea rugosidad hidráulica y resistencia al flujo. Manzanas con baja densidad generalmente muestran más edificios dañados que las de alta densidad (Ettinger *et al.*, 2016). Sin embargo, dado que los análisis de amenaza consideran la rugosidad producida por las edificaciones y permiten una estimación de las velocidades, se considera que este parámetro no requiere ser tenido en cuenta en los indicadores de vulnerabilidad. Ettinger *et al.* (2016) también encontró que la forma de la manzana es importante para la propagación del flujo y desviación de velocidades, sin embargo, de igual forma este efecto se considerará en la evaluación de la amenaza.

De la revisión de literatura realizada y la disponibilidad de información se escogieron como indicadores de la vulnerabilidad física de las construcciones (ver Tabla 6): (1) el número de pisos, (2) el tamaño de la construcción, (3) el sistema estructural, y (4) construcciones entre otras construcciones.

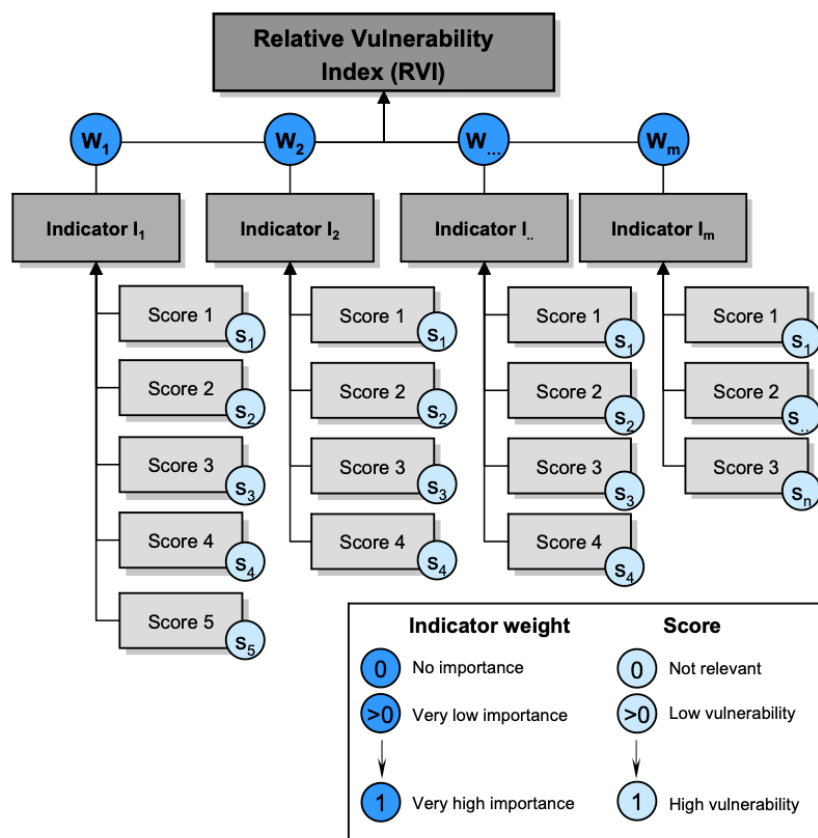
El material de muros no se incluyó como indicador debido a que hace parte del sistema estructural.

En cuanto al sistema estructural, como se mencionó en la sección 5, la mayoría de las construcciones son de mampostería simple, sin embargo también hay otros tipos de sistemas estructurales, por lo cual se asignará un puntaje al sistema estructural tomando como base la metodología presentada por Kappes *et al.* (2012) cuyo marco se muestra en la Figura 21.

Tabla 6. Variables consideradas para construir indicadores de vulnerabilidad física

Variable	Objetivo	Valor
Número de pisos	Para una profundidad de inundación específica la tasa de daño de una construcción es generalmente más alta en una construcción de un piso que en una de dos o más (Reese and Ramsay, 2010) (Ettinger <i>et al.</i> , 2016). Esta consideración es aplicable para cualquier tipo de flujo (inundaciones fluviales o flujos de detritos) debido a que en el caso de flujos de detritos generalmente entre más alta es la construcción, la posibilidad de daño debido a la entrada de material a través de las ventanas y puertas es menor (Godfrey <i>et al.</i> , 2015).	1-14
Tamaño de la construcción	Edificios más grandes son más vulnerables que edificios pequeños debido a una mayor presencia y tamaño de orificios y generalmente menor cantidad de columnas (Ettinger <i>et al.</i> , 2016). El tamaño de la construcción también fue seleccionado por Godfrey <i>et al.</i> (2015) como uno de los indicadores para evaluar vulnerabilidad física ante inundaciones súbitas y flujos de detritos.	m ²
Sistema estructural	Según el tipo de estructura y material las construcciones muestran diferente respuesta a la presión dinámica causada por inundaciones y movimientos en masa (Godfrey <i>et al.</i> , 2015).	0-1
Construcciones entre otras construcciones	Este criterio fue usado por Godfrey <i>et al.</i> (2015) ya que construcciones que están adyacentes a otras tienen menos superficie de estructura expuesta al impacto directo del flujo y menos ventanas. Para medir este variable se propone utilizar el perímetro de la construcción no colindante con otra edificación.	metros

Figura 21. Marco metodológico para el cálculo de índices de vulnerabilidad



Fuente: Kappes et al. (2012)

El puntaje del sistema estructural se asignó en una escala de 0 (no relevante) a 1 (altamente vulnerable). Los sistemas estructurales que se identificaron en la cuenca se agruparon como se muestra en la Tabla 7, buscando que coincidieran en lo posible con las categorías definidas por Leal et al. (2021), que compila los trabajos previos de asignación de pesos para sistemas estructurales para indicadores de vulnerabilidad física ante inundaciones súbitas. De esta forma fue posible utilizar los puntajes propuestos por Leal et al. (2021) que se basan en juicio experto.

Tabla 7. Categorías de sistemas estructurales y puntaje asignado

Categoría	Puntaje
Sin sistema estructural (SIN) o material de recuperación o madera	1
Adobe y bahareque	0.9
Mampostería simple, semiconfinada y prefabricada	0.6
Mampostería confinada, pórticos en concreto reforzado, reticular celulado, pórticos en concreto con muros de mampostería y mampostería reforzada	0.3
Concreto: en este grupo de incluyeron los sistemas estructurales de muros de concreto, sistema dual y pórticos de concreto con muros de concreto	0.1

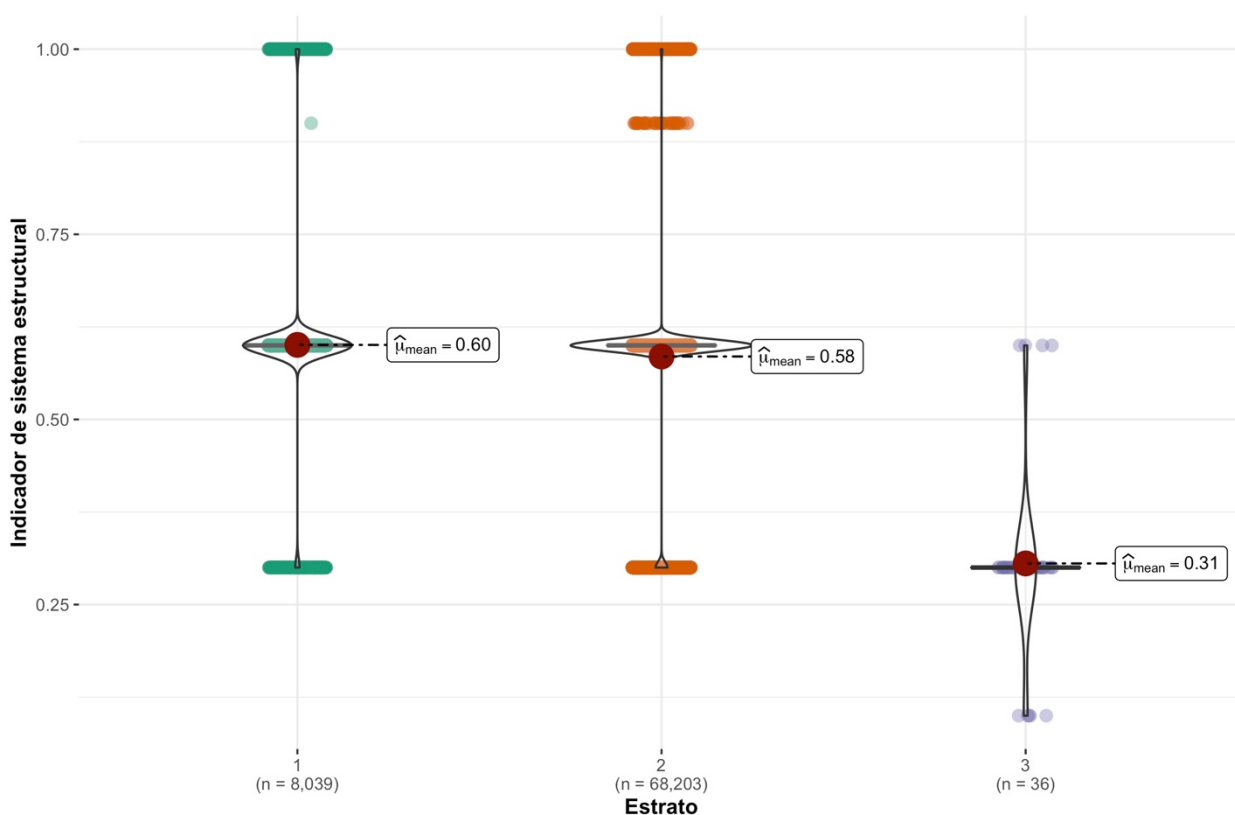
Los puntajes propuestos por Leal et al. (2021) y que son la base de la Tabla 7, reflejan las consideraciones sobre los materiales encontradas por otros autores:

1. Edificios de mampostería (simple, semiconfinada y confinada) son más vulnerables que edificaciones en concreto (Ettinger *et al.*, 2016). En general edificaciones con muros de concreto ofrecen la mayor resistencia a las inundaciones y a los flujos de detritos; construcciones en madera tienden a flotar mientras que las de mampostería son más estables (Godfrey *et al.*, 2015).
2. En general las viviendas de concreto y mampostería reforzada se consideran más resistentes a las inundaciones e incluso es uno de los tipos constructivos recomendados en zonas susceptibles a las inundaciones (Reese y Ramsay 2010).
3. La vulnerabilidad de viviendas construidas en mampostería simple es mayor que aquellas construidas en mampostería reforzada (Lo et al. 2012; Kang and Kim 2016).

Durante los ejercicios de asignación de pesos por juicio experto, los expertos consideran aspectos como los listados arriba para de manera subjetiva asignar los pesos. Diferentes expertos pueden asignar pesos diferentes, lo cual es una limitación de este tipo de métodos. Sin embargo, se considera que a falta de un ejercicio de juicio experto propio para la cuenca de la quebrada Chiguaza, los pesos que se encontraron en la literatura constituyen un buen punto de partida.

Los diagramas de caja de los valores asignados a los sistemas estructurales de las construcciones de la cuenca se muestran en la Figura 22. La media de los valores (μ_{mean}) se concentra en los estratos 1 y 2 en valores cercanos a 0.6, esto porque la mayoría de las construcciones son de mampostería simple. La media del indicador en el estrato 3 es significativamente más baja que en los estratos 1 y 2 mostrando una mejor calidad constructiva.

Figura 22. Diagramas de caja de los valores del indicador de sistema estructural para construcciones residenciales



En lo que se refiere al número de pisos, se utilizaron los pesos propuestos por Leal et al. (2021) en donde para viviendas de 1 piso se asigna el mayor puntaje, es decir 1, para viviendas de 2 pisos 0.5 y para viviendas de 3 o más pisos 0.33, el diagrama de cajas de los pesos asignados se muestra en la Figura 23. La asignación del puntaje obedece al razonamiento de que edificios de un piso son afectados un 100% al estar expuestos a una inundación, edificios de 2 pisos generalmente son afectados en un 50% de su área en caso de que la inundación alcance una profundidad suficiente y edificios de 3 o más pisos se afectan en menor medida (Leal *et al.*, 2021). La media del indicador (μ_{mean}) es similar para los estratos 1 y 2. En el caso del estrato 3 se obtiene una media mucho más baja (0.45) mostrando que en su mayoría las construcciones en este estrato corresponden a edificios en conjuntos residenciales.

Para medir el criterio de construcciones entre construcciones, se calculó el porcentaje del perímetro de las construcciones que no colinda con otra construcción. Entre más alto es este porcentaje más expuesta está la vivienda al impacto directo del flujo. El diagrama de cajas de este indicador se muestra en la Figura 24. La media del indicador (μ_{mean}) más alta se obtiene en las construcciones en el estrato 3 ya que en su mayoría son bloques de edificios individuales que no tienen un perímetro compartido con otra construcción.

Figura 23. Diagramas de caja de los valores del indicador de número de pisos para construcciones residenciales

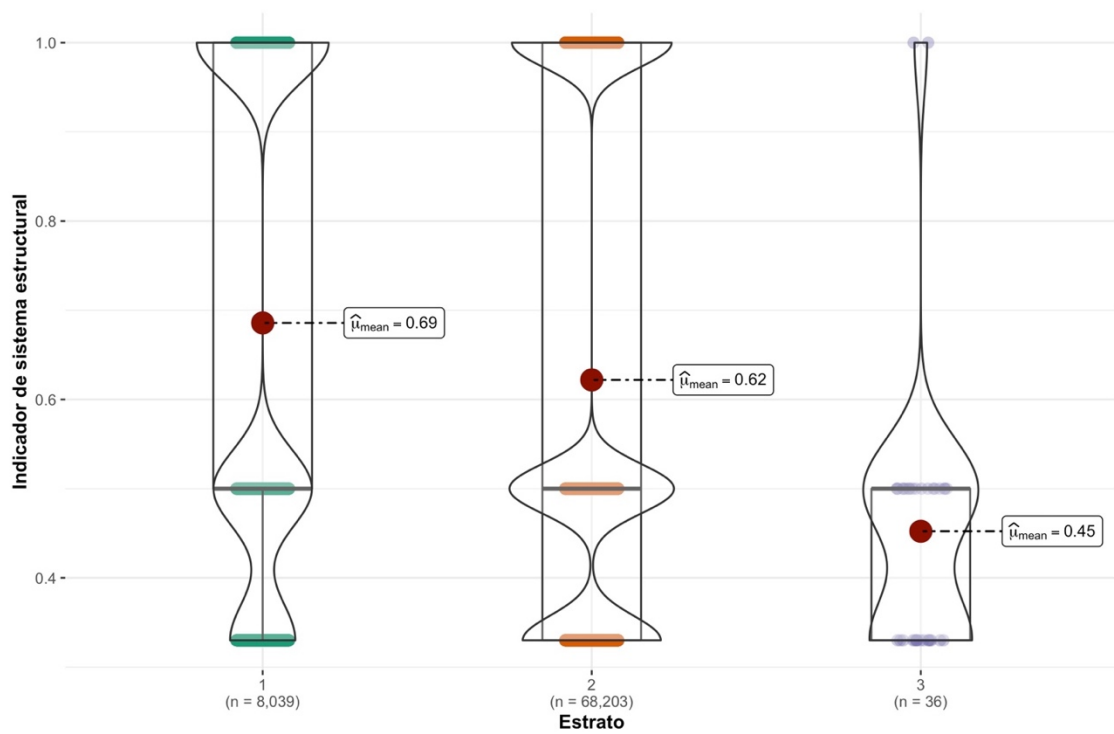
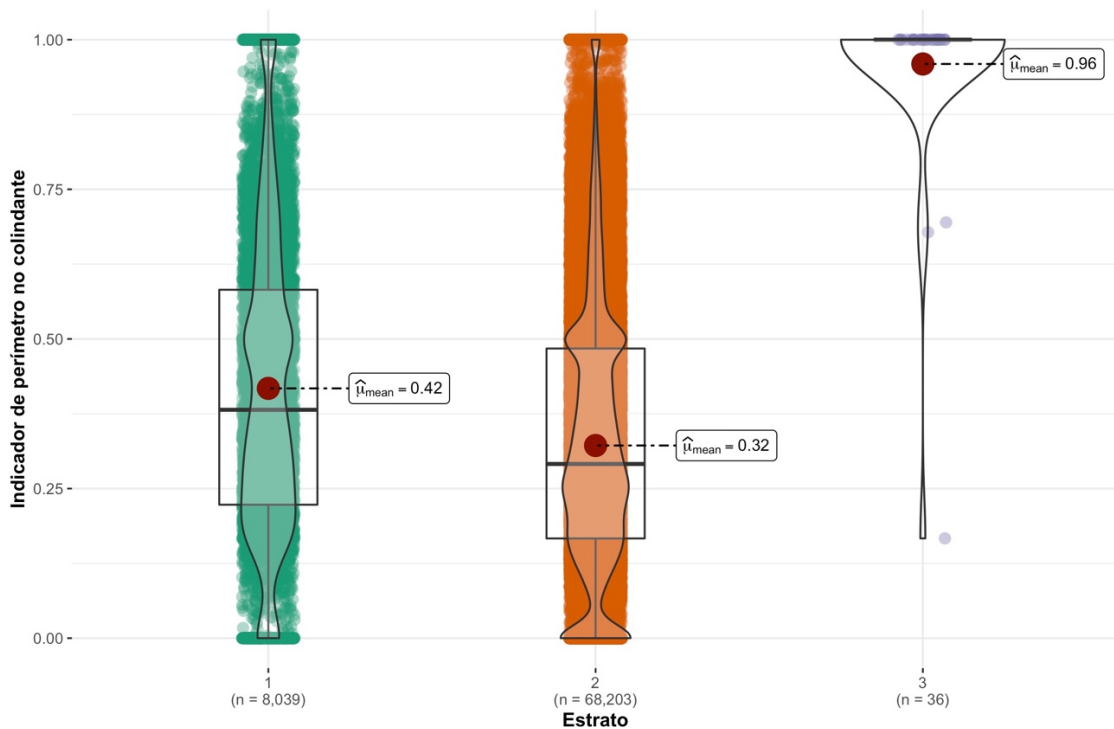
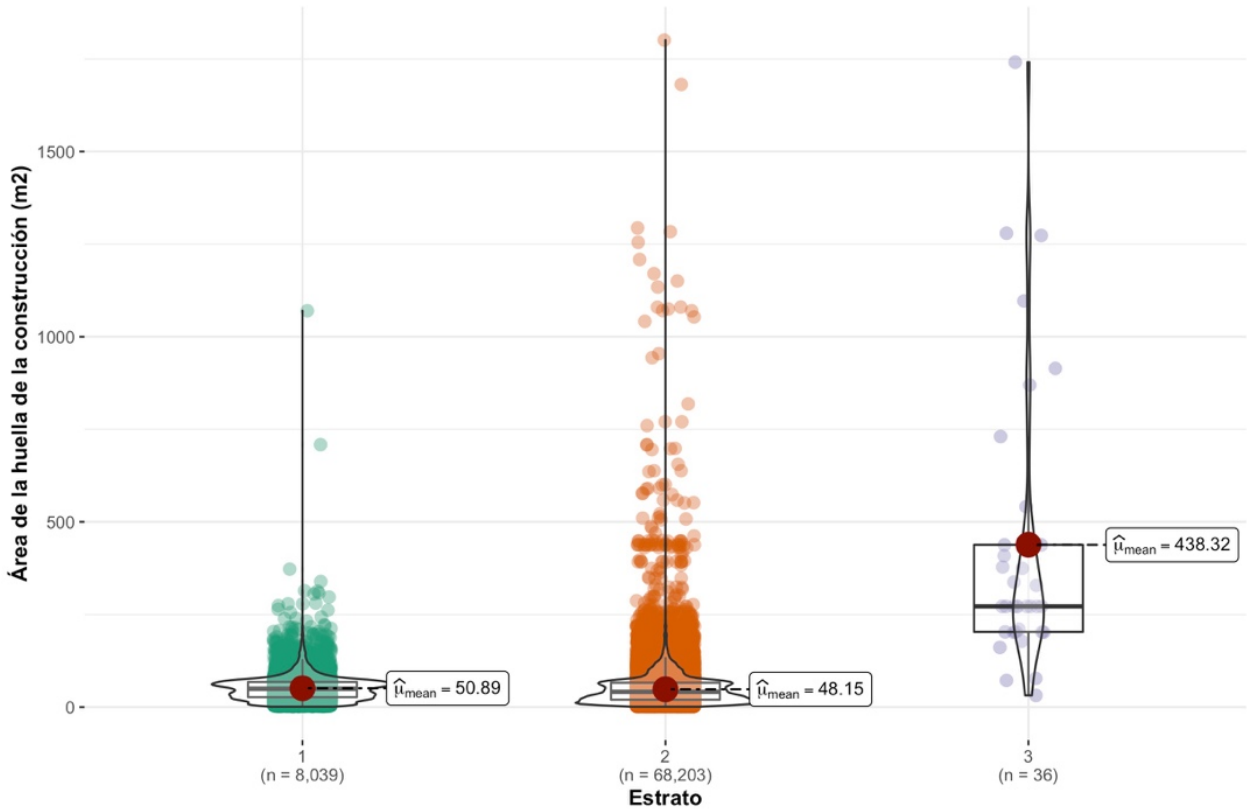


Figura 24. Diagramas de caja de los valores del indicador de perímetro no colindante



Los valores del área de la huella del edificio que serán utilizados como indicador del tamaño de la construcción (Ettinger *et al.*, 2016) se muestran por estrato en la Figura 25.

Figura 25. Diagramas de caja del área de la huella de las construcciones



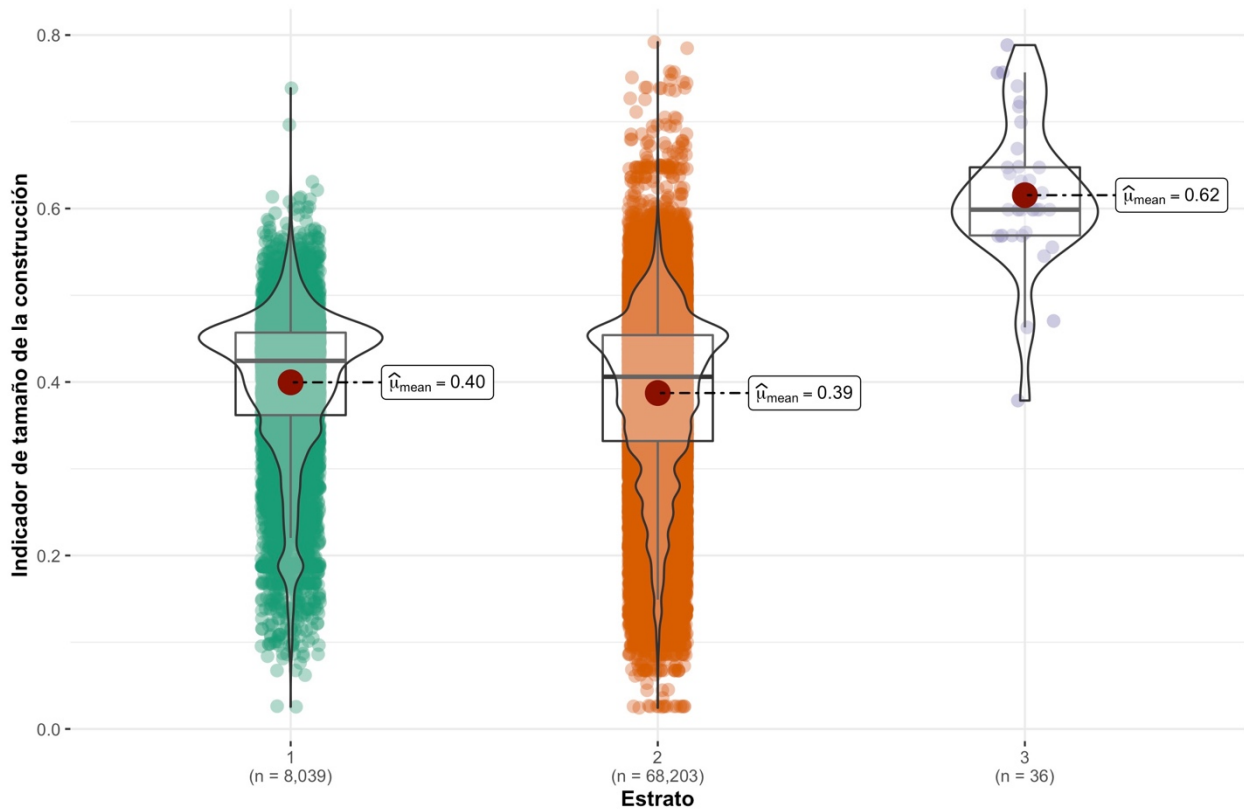
Los diagramas de caja (Figura 25) muestran que en los estratos 1, 2 y 3 se presentan valores extremos que generan una distribución altamente asimétrica. La asimetría de todo el conjunto de datos es 69.59 y la curtosis es 9105. Para tratar los valores extremos se aplicó una transformación logarítmica antes de transformar los datos a una escala max-min (1-0) utilizando la Ecuación 1. Los valores transformados y normalizados se muestran en la Figura 26.

$$X_j = \frac{x_j - \text{Min}(x_j)}{\text{Max}(x_j) - \text{Min}(x_j)}$$

Ecuación 1

La media de los valores del indicador (μ_{mean}) para los estratos 1 y 2 es similar. En el caso del estrato 3, el valor del indicador es significativamente mayor debido a que la huella de los edificios de los conjuntos residenciales que se encuentran en este estrato es en general mucho mayor a la huella de las construcciones en los otros estratos.

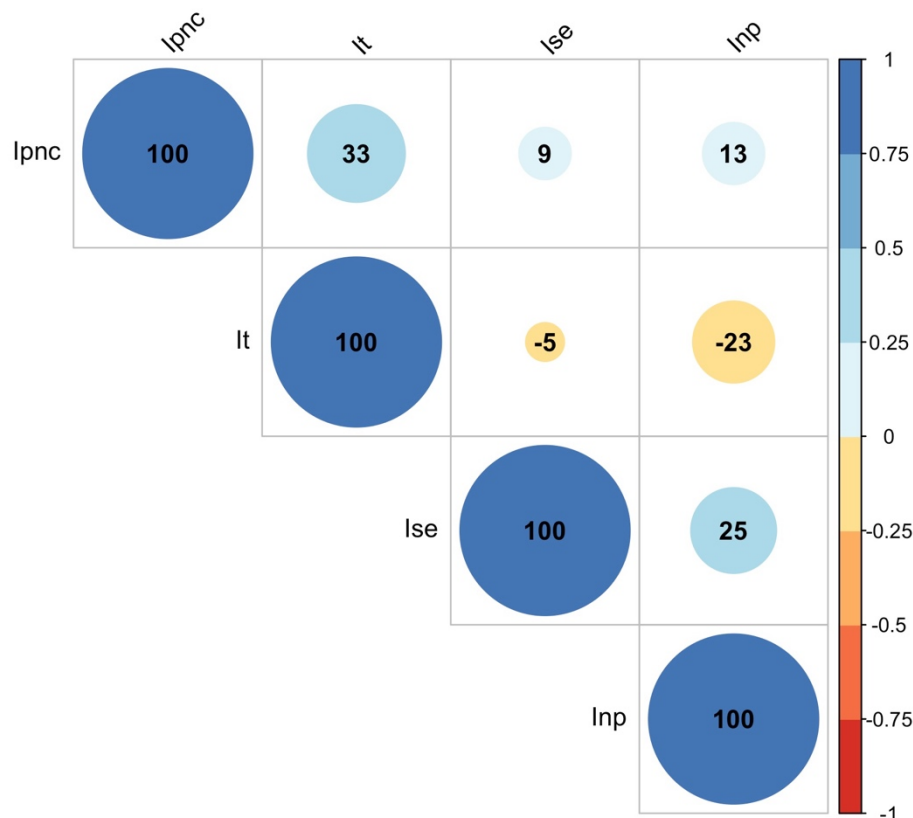
Figura 26. Diagramas de caja de los valores del indicador de tamaño



Fuente de datos: UAECD (2021)

La matriz de correlación de los cuatro indicadores se muestra en la Figura 27. El valor máximo de correlación alcanzado es 33% entre el indicador de tamaño y el de número de pisos. Estos valores de correlación son bajos, y muestran que cada indicador está midiendo aspectos de la vulnerabilidad física diferentes y no relacionados entre sí.

Figura 27. Matriz de correlación de los indicadores



Nota: Ipnc corresponde al indicador de perímetro no colindante, It al indicador de tamaño, Ise al indicador de sistema estructural y Inp al indicador del número de pisos

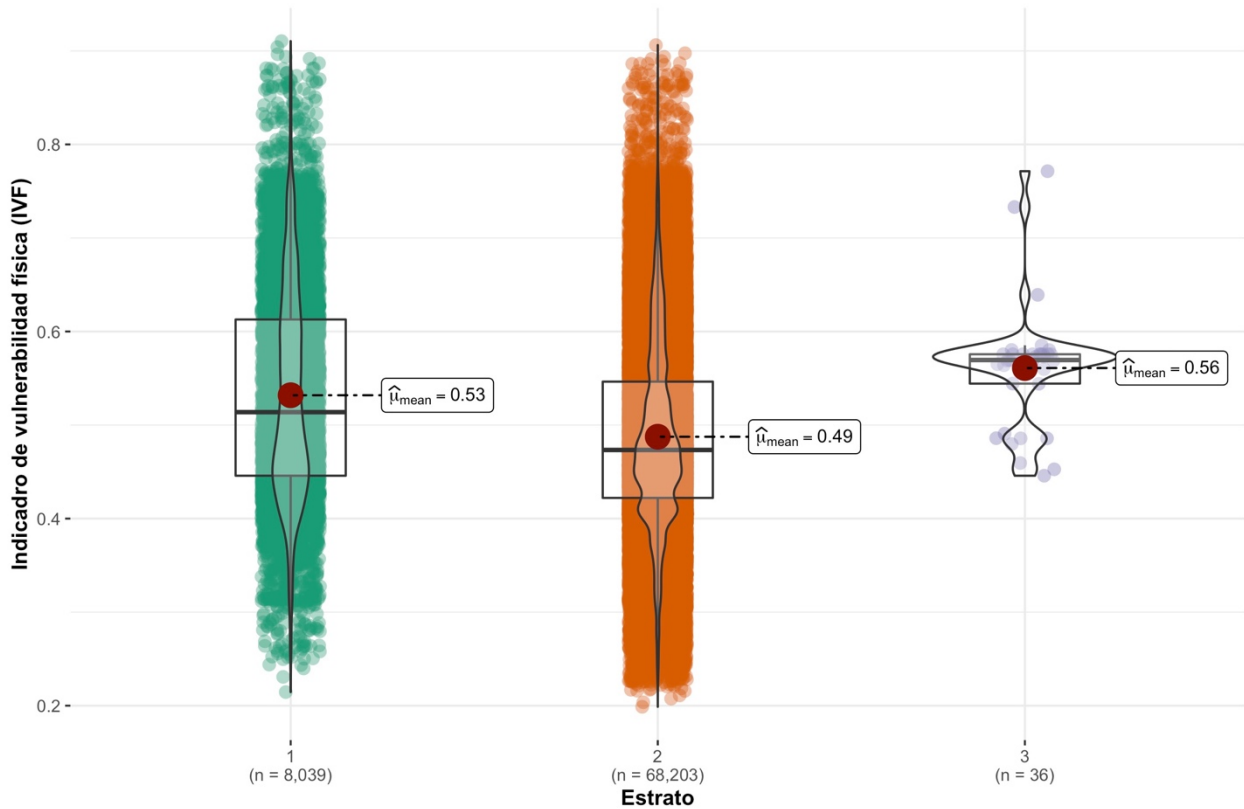
El sistema estructural ha sido identificado como uno de los factores más importantes en la vulnerabilidad de las construcciones ya que determina la fragilidad física y la resistencia al impacto del agua (Leal *et al.*, 2021). Por esta razón algunos autores le han dado un peso mayor que a otros indicadores de evaluación de la vulnerabilidad física (ver por ejemplo Leal *et al.* (2021)). Bajo esta consideración, para el análisis de la quebrada Chiguaza se utilizará un peso para este indicador de 0.31 y a los demás indicadores un peso igual de 0.23. El indicador final estará dado por la combinación lineal de los cuatro indicadores como se muestra en la Ecuación 2 donde IVF es el indicador de vulnerabilidad física, Ise el indicador de sistema estructural, Inp el indicador del número de pisos, Ipnc el indicador de perímetro no colindante e It es el indicador de tamaño.

$$IVF = 0.31Ise + 0.23Inp + 0.23Ipnc + 0.23It \quad \text{Ecuación 2}$$

La distribución de los valores del indicador se muestra en los diagramas de caja de la Figura 28. La distribución de los valores y la media muestran que las viviendas de estrato dos tienen en general un indicador de vulnerabilidad física (IVF) menor que las de estrato uno y menor que las de estrato 3. Las construcciones en el estrato 3 muestran una media (μ_{mean}) ligeramente más alta que la de los otros dos estratos y menor dispersión de los datos. Esto se debe a que, aunque los sistemas estructurales son mejores y tienen varios pisos, son construcciones individuales que no

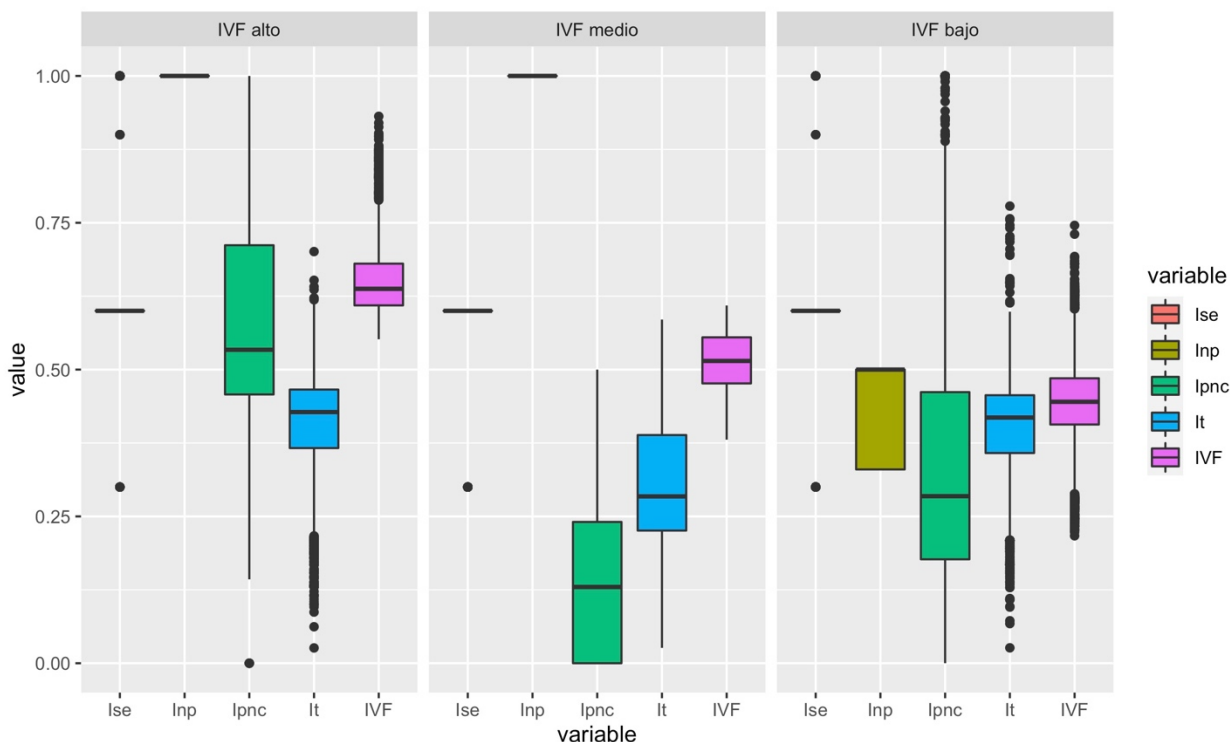
colindan con otras y con una huella más grande que las construcciones en los otros estratos. La distribución espacial del IVF se muestra en la Figura 31.

Figura 28. Diagramas de caja del valor del indicador de vulnerabilidad física para las viviendas de la cuenca



Para identificar las características de grupos de construcciones agrupadas según los indicadores y el IVF, se utilizó agrupamiento jerárquico (Clustering Jerárquico o Hierarchical Clustering en inglés). El agrupamiento jerárquico es un método de data mining para agrupar datos. El algoritmo de clúster jerárquico agrupa los datos basándose en la distancia entre cada uno y buscando que los datos que están dentro de un clúster sean los más similares entre sí (Estrategias de Trading, 2020). De esta forma, se obtienen grupos de construcciones con características de vulnerabilidad similares. El resultado del agrupamiento se muestra en la Figura 29. Se utilizaron 3 grupos que pudieron ser asociados a valores del IVF altos, medios y bajos. Los valores del IVF altos corresponden a construcciones de un solo piso con sistemas estructurales poco resistentes y porcentajes de perímetro no colindante con mediana por encima del 50%. Los valores de IVF medios corresponden a sistemas estructurales medianamente resistentes, de un solo piso y perímetros no colindantes inferiores al 25% en su mayoría. Los valores de IVF bajos corresponden a viviendas con sistemas estructurales variados de más de un piso y con perímetros no colindantes inferiores al 40% en su mayoría. En cuanto al indicador de tamaño, este no es un discriminante significativo.

Figura 29. Diagramas de caja de los indicadores y del IVF para cada grupo



La Figura 30 muestra las gráficas de densidad y caja del IVF para los 3 grupos identificados. Las líneas punteadas de la gráfica fueron dibujadas en el punto intermedio entre el tercer cuartil de un grupo y el primer cuartil del siguiente con el fin de establecer un límite de valor del IVF que permita separar los 3 grupos. Es decir, el grupo de IVF bajo estará dado por el rango 0-0.48, el medio por el rango 0.48-0.58 y el alto entre 0.58 y 1. Al comparar estos límites con los utilizados en la cuenca de la quebrada Limas, a la cual se le aplicó la misma metodología (IDIGER, 2021) se observa que en la quebrada Limas los límites eran ligeramente mayores (IVF bajo en el rango 0-0.55, medio en el rango 0.55-0.66 y alto entre 0.66 y 1), esto se debe a la diferencia en la distribución estadística de los datos y por lo tanto diferencias en el agrupamiento. Además, los datos parecieran indicar que las construcciones en la quebrada Chiguaza en general, tienen valores del IVF inferiores a los de la quebrada Limas indicando una vulnerabilidad física menor. Una opción podría ser unificar los límites de agrupamiento del IVF para las dos cuencas o manejarlos por separado bajo el entendido de que son límites relativos a las construcciones existentes en la cuenca. Por ahora, en este informe el indicador se manejará relativo y se deja para fases posteriores la posibilidad de unificación del indicador para la quebrada Limas y otras zonas de estudio de la ciudad.

La distribución espacial del IVF se muestra en la Figura 31. Aunque los valores alto del IVF están distribuidos en toda la cuenca, hay una mayor concentración en la zona de confluencia de la quebrada Chiguaza y el río Tunjuelo (barrios Tunjuelito y San Benito), la cuenca alta y el sur oriente de la cuenca. Los indicadores de tamaño (It), perímetro no colindante (Ipnc), número de pisos (Inp) y sistema estructural (Ise) se muestran en la Figura 32.

Figura 30. Gráficas de densidad y caja de los valores del IVF para los grupos de IVF bajo, medio y alto

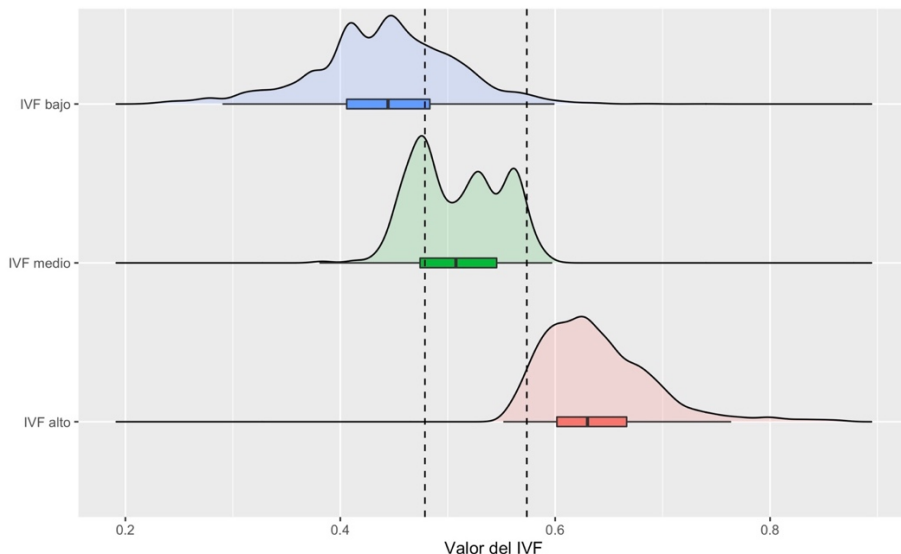


Figura 31. Indicador de vulnerabilidad física (IVF) con las categorías dadas por los límites en la Figura 30

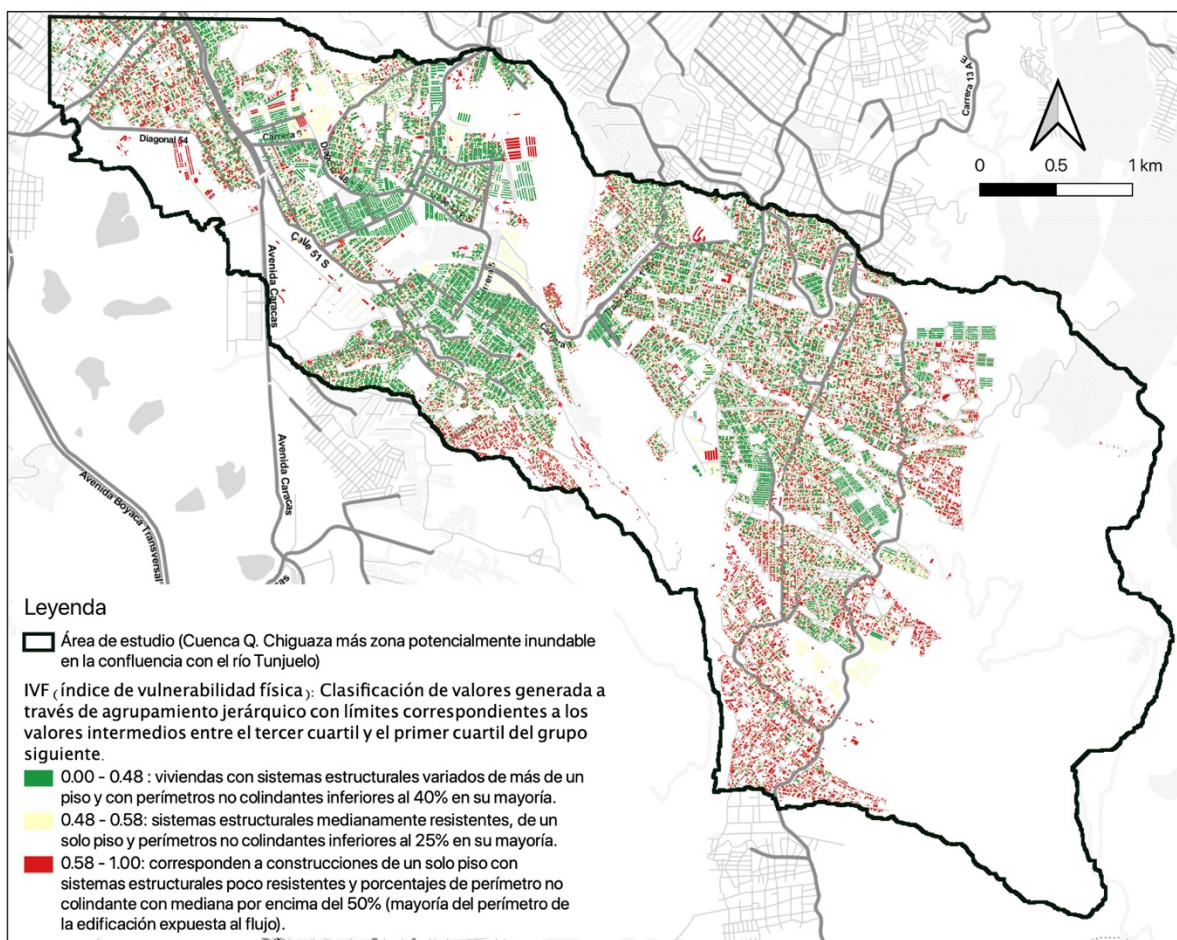
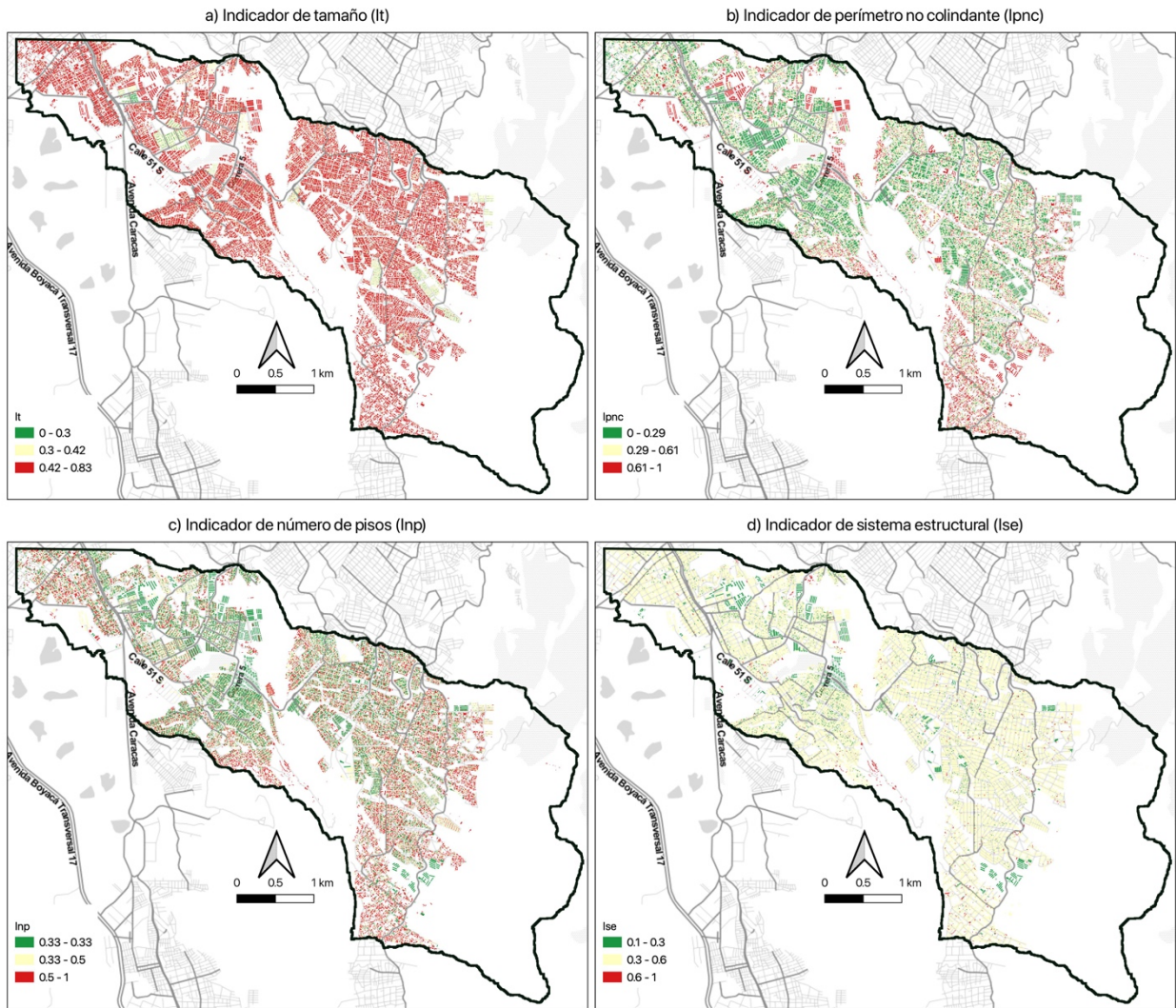


Figura 32. Indicadores de tamaño (It), perímetro no colindante (Ipnc), número de pisos (Inp) y sistema estructural (Ise)



□ Área de estudio definida como la cuenca de la quebrada Chiguaza más un área estimada en la confluencia con el río Tunjelo que podría potencialmente estar expuesta a inundaciones.

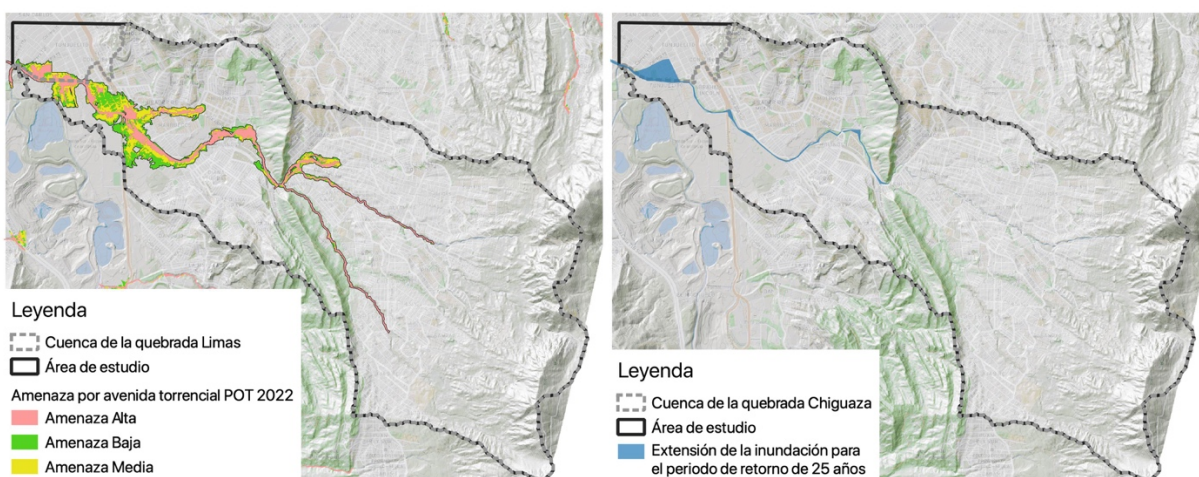
9.4 VULNERABILIDAD FÍSICA EN EL ÁREA PRELIMINAR DE EXPOSICIÓN

El indicador de vulnerabilidad desarrollado en la sección anterior busca evaluar la vulnerabilidad física intrínseca de las viviendas, es por esto que puede ser calculado para todas las construcciones existentes en la cuenca. Sin embargo, un elemento solo es vulnerable cuando está expuesto a una amenaza. Con el fin de generar un área preliminar de exposición, se utilizó el mapa de zonificación por avenida torrencial desarrollado para el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Bogotá de 2022¹¹ a escala 1:5000 y el mapa de amenaza de inundación generado por JICA (2006). Estos mapas se muestran en la Figura 33 (a y b).

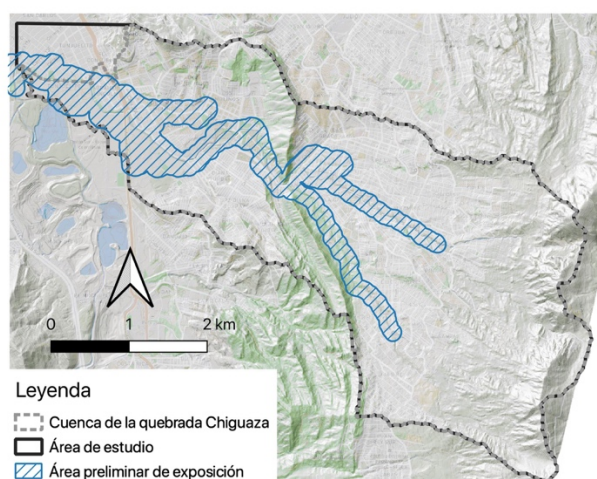
Figura 33. a) amenaza por avenida torrencial POT 2022, b) extensión de la inundación con el periodo de retorno de 25 años (JICA, 2006), y c) área preliminar de exposición

a) Amenaza por avenida torrencial POT 2022

b) Extensión de la inundación con el periodo de retorno de 25 años (JICA, 2006)



c) Área preliminar de exposición



Fuente: POT 2022, JICA (2006),  mapbox © Mapbox, © OpenStreetMap

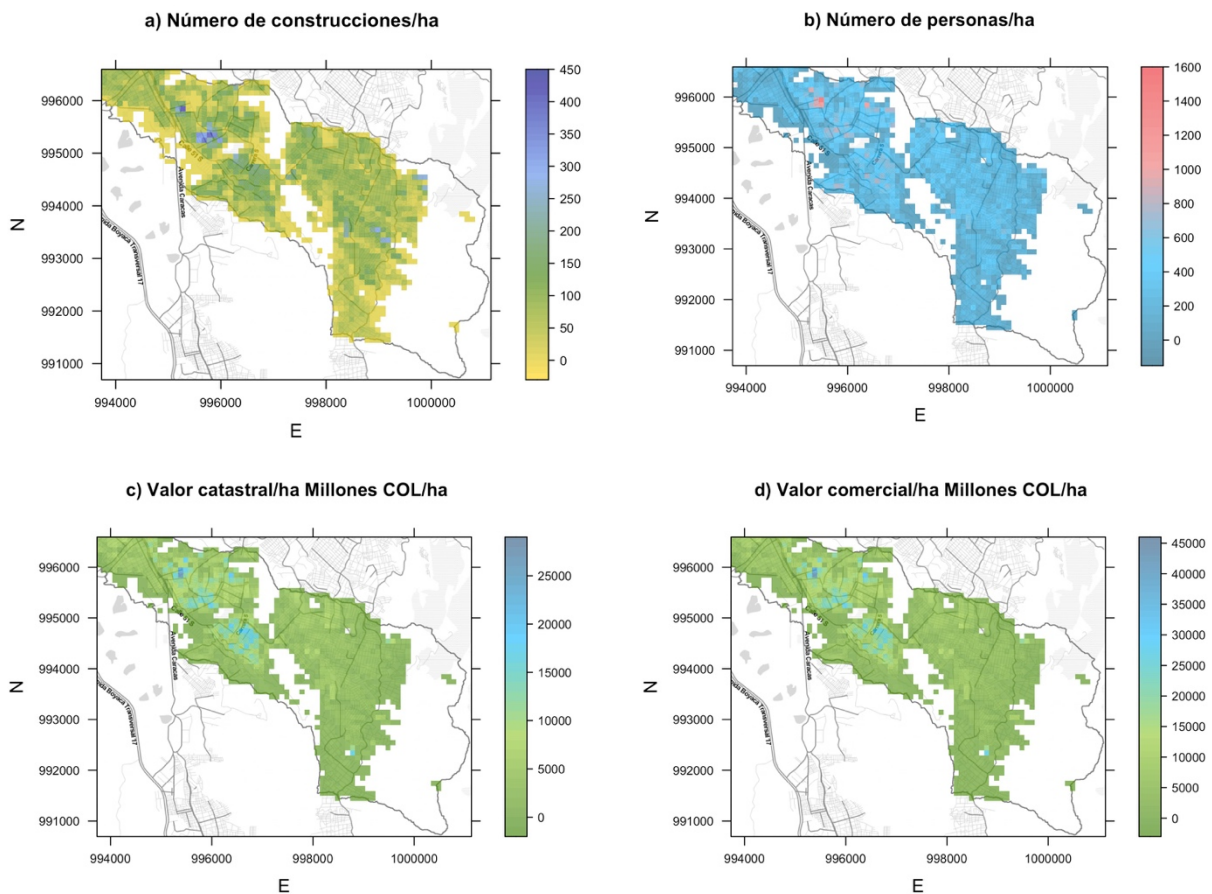
¹¹ La capa de avenida torrencial puede ser visualizada en <https://experience.arcgis.com/experience/e98ec14cafbc440fac30664aff6d1ac3>

Las extensiones de las tres zonas de amenaza (alta, media y baja) del POT 2022 y la extensión de la inundación estimada por JICA (2006) se superpusieron y a la capa resultante se le adicionó un buffer de 100 metros, el área resultante de esta operación se utilizó como área preliminar de exposición (ver Figura 33 (c)). Con base en el área preliminar se obtuvieron las estadísticas de viviendas y población. Este es un análisis preliminar al que será desarrollado en el análisis de riesgo de detalle y que solo proporciona información general de los elementos considerados preliminarmente expuestos a cualquier condición de intensidad. Dentro de los análisis de riesgo se evaluará a que intensidad de amenaza está sometido cada elemento y esta condición a que daño conduce y su probabilidad asociada.

La capa con las huellas de las construcciones y el área de exposición preliminarmente estimada se intersecaron espacialmente para extraer las estadísticas asociadas a la población y a las construcciones. Una construcción y sus habitantes se consideran expuestos si parcial o completamente la huella de su polígono se sobrepone con el área preliminar de exposición.

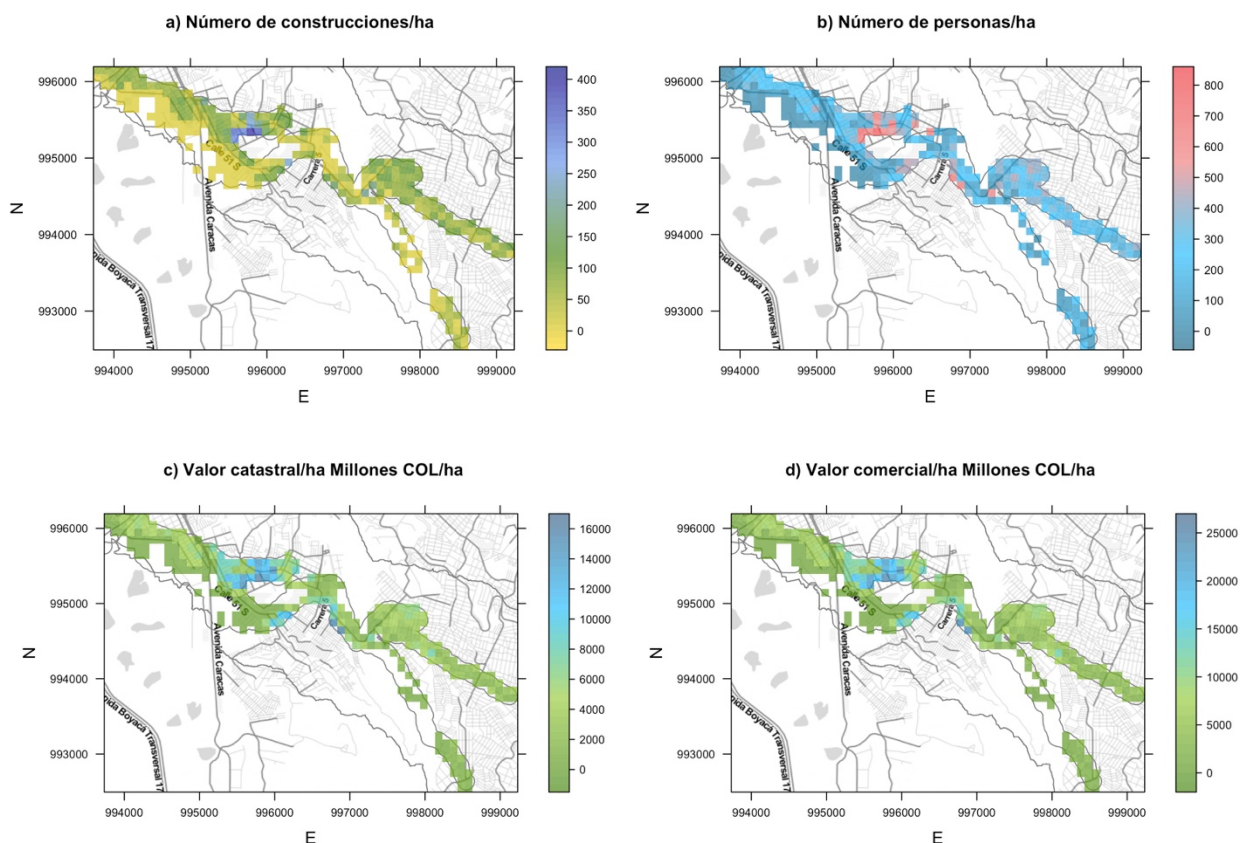
Con el fin de analizar densidades y agregar espacialmente los resultados, se creó una malla arbitraria de 100 metros (una hectárea), para la cual se calculó la densidad de edificios expuestos (edificios/ha), densidad de personas expuestas (personas/ha), valor catastral expuesto (millones de pesos/ha) y valor económico expuesto (millones de pesos/ha). Las densidades para toda la cuenca (expuestas y no expuestas) se muestran en la Figura 34.

Figura 34. Densidades de edificaciones, personas y valores para toda la cuenca



Las densidades en la zona preliminar de exposición se muestran en la Figura 35. Las zonas en donde se concentran los valores más altos de construcciones, personas y valor expuesto por hectárea corresponden a conjuntos residenciales (conjunto residencial Marruecos y apartamentos San José-Molinos).

Figura 35. Densidades de edificaciones, personas y valores para la zona preliminar de exposición



La estadística de autocorrelación $G_i^*(d)$ desarrollada por Getis y Ord (1992) se aplicó a los datos de densidad de construcciones, personas y valor de construcciones de toda la cuenca para identificar hotspots (puntos calientes) de exposición¹². Este procedimiento permite detectar estadísticamente grupos significativos de valores altos en términos de densidades u otros valores. La Figura 36 muestra los puntos calientes en tonalidades rojas mientras que los puntos fríos se muestran en tonalidades azules, entre más intenso es el rojo, la concentración de valores altos

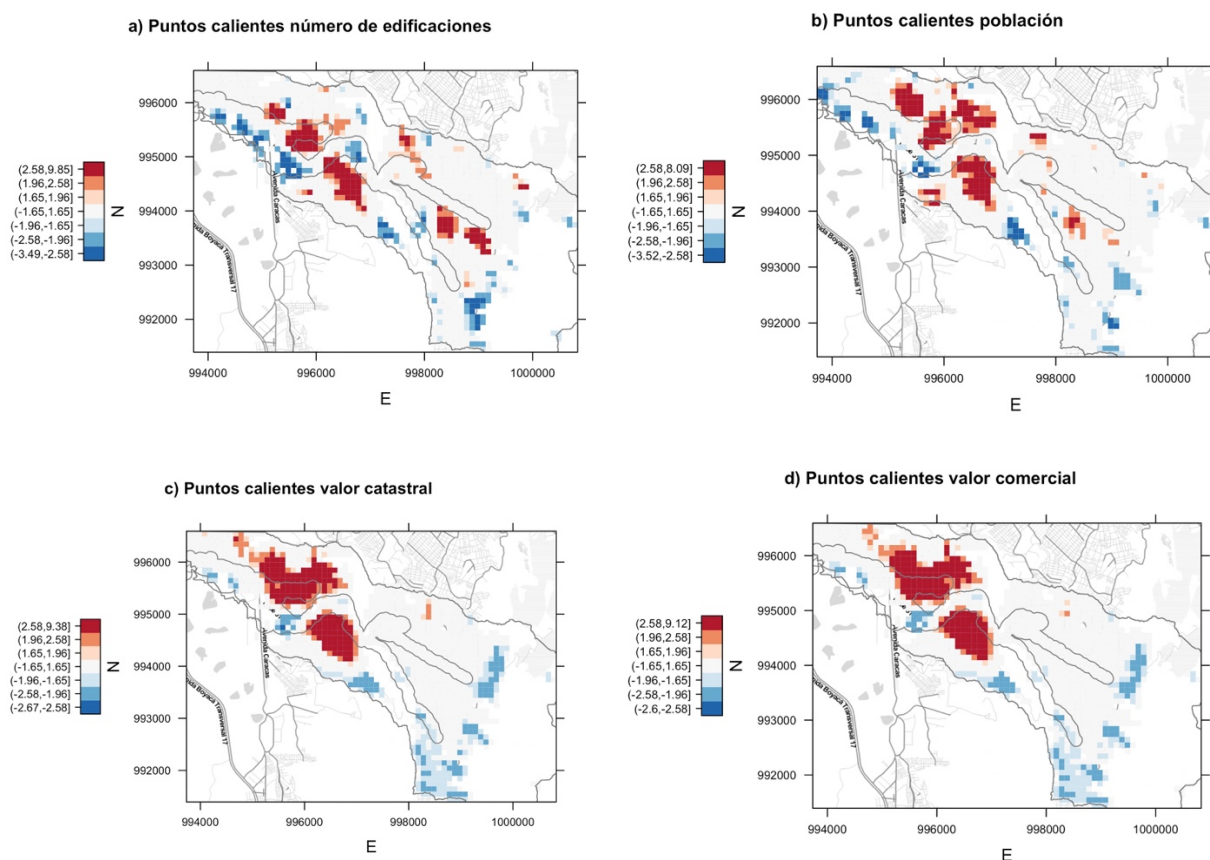
¹² La exposición está definida como la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza (Ley 1523 de 2012) (SNGRD, 2017). En este análisis la exposición analiza solo la presencia de construcciones, valor de construcciones y personas. Nótese que este análisis es desarrollado de manera independiente al IVF y muestra exclusivamente como se concentran en el área de estudio el número de construcciones, el valor de las construcciones, y las personas sin identificar cómo pueden sufrir daño en caso de que ocurra una inundación.

es más significativa. Las tonalidades rojas más intensas se localizan en la zona media de la cuenca y existen zonas de puntos calientes localizadas dentro del área preliminar de exposición.

Además de los puntos calientes de exposición (concentración de construcciones, valor de las construcciones y personas), se realizó un análisis de puntos calientes del IVF cuyo resultado se muestra en la Figura 37. Los puntos calientes del IVF se localizan en forma contraria a los puntos calientes de densidad de construcciones, población y valor de las construcciones. Esto se debe a que las zonas en donde se concentran los valores altos de exposición (construcciones/ha, personas/ha y valores/ha) no son las zonas más vulnerables. Como se mencionó anteriormente, las zonas de conjuntos residenciales son las que concentran las densidades más altas y estas tienen indicadores de vulnerabilidad física menores debido a que la calidad de la construcción es mejor que en las zonas informales.

La mayoría de los puntos calientes de IVF se localizan en la cuenca alta y algunos en la zona baja de la cuenca, esto debido a que es en estas zonas donde se concentran las viviendas con menores pisos, sistemas estructurales menos resistentes y construcciones más aisladas unas de otras.

Figura 36. Hotspots (puntos calientes) para diferentes variables

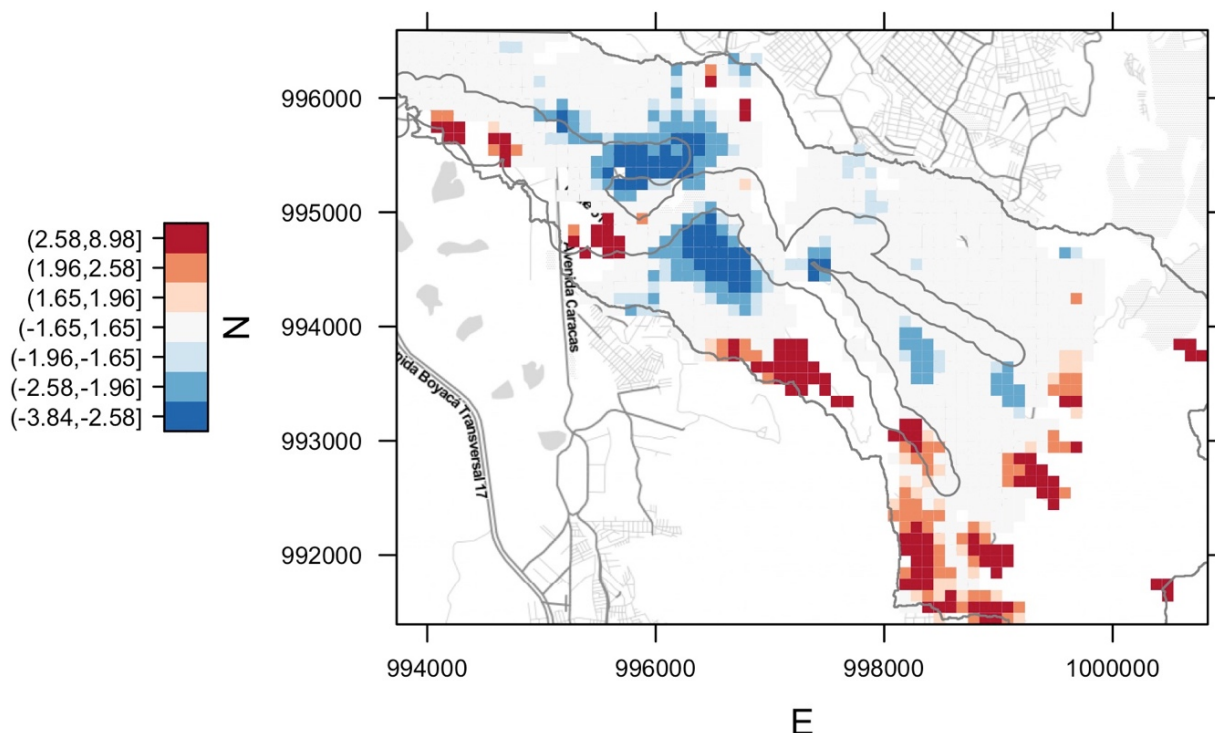


Nota: el color de los pixeles muestra el valor de la estadística Gestis-Ord GI* en z-scores. La categoría en rojo más fuerte muestra un alto agrupamiento de valores altos, el color blanco corresponde a un agrupamiento insignificante y el azul más oscuro muestra un alto agrupamiento de valores bajos.

La Figura 38 muestra el resumen de las características de la zona preliminar de exposición. El sistema estructural dominante es la mampostería simple y la tipología estructural del 34% de las viviendas es la mampostería simple de un piso. La mayoría de la zona es de estrato 2 y la mayoría de las construcciones tiene uno o dos pisos. Las construcciones son primordialmente residenciales. La cantidad de construcciones con su respectivo uso según la identificación de la UAECD se muestra en la Tabla 8 (construcciones identificadas en la ortofoto IDIGER (2022b) no se incluyen, por esta razón el valor difiere del presentado en la Figura 38).

Figura 37. Hotspots (puntos calientes) para el IVF

Puntos calientes IVF



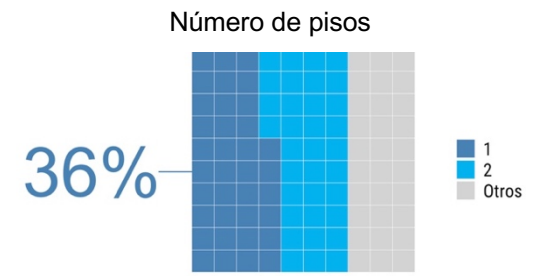
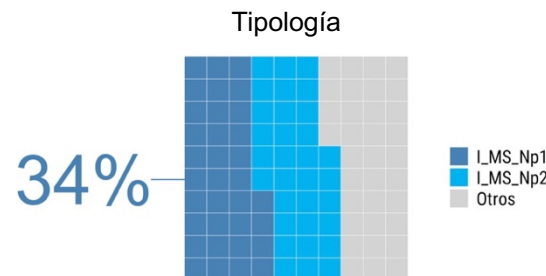
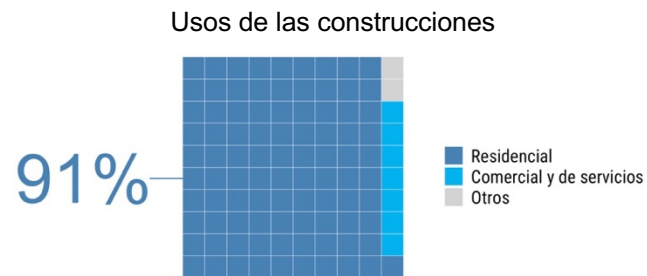
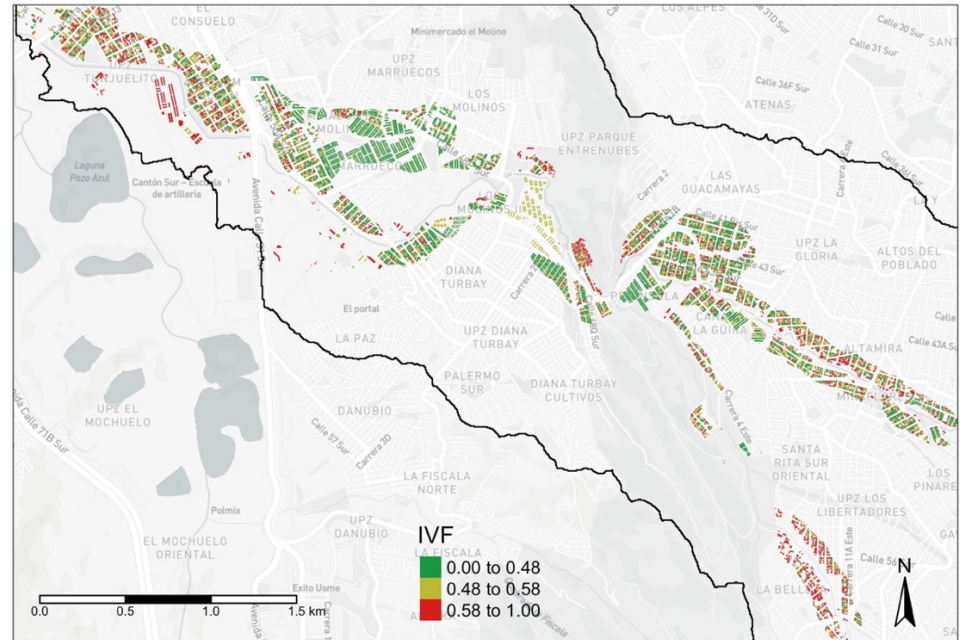
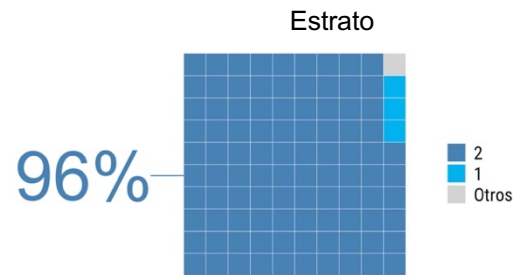
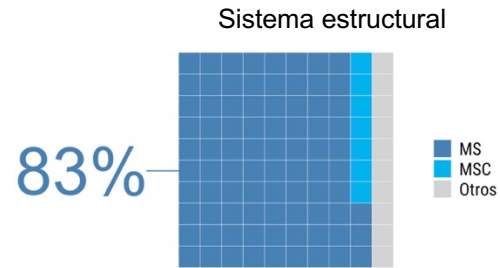
Nota: el color de los pixeles muestra el valor de la estadística Gestis-Ord GI* en z-scores. La categoría en rojo más fuerte muestra un alto agrupamiento de valores altos, el color blanco corresponde a un agrupamiento insignificante y el azul más oscuro muestra un alto agrupamiento de valores bajos.

Tabla 8. Uso y cantidad de construcciones en la zona preliminar de exposición

Uso	Cantidad de construcciones
Comercial y de servicios	1310
Dotacional	204
Industrial	209
Recreacional Deportivo	1
Residencial	16730
Total	18454

Nota: 404 construcciones no tienen uso asignado en las capas del UAECD disponibles en IDECA

Figura 38. Resumen de características de la zona preliminar de exposición



Número de construcciones 18858

Número de personas* 62,726

Nota: *Estimado de personas en construcciones residenciales

9.5 CONSIDERACIONES INICIALES PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SOCIAL

Las condiciones socioeconómicas son un factor fundamental dentro de las evaluaciones de vulnerabilidad, además de su uso en la construcción de indicadores, también han sido utilizadas dentro de la construcción de curvas de vulnerabilidad (Baró-Suárez *et al.*, 2011). El entendimiento de la vulnerabilidad social es fundamental para la gestión del riesgo y su evaluación ha sido generalmente realizada a través de índices e indicadores (Karagiorgos *et al.*, 2016). La construcción de índices de vulnerabilidad que combinan sus dimensiones (ver sección 3.1 para más información sobre las dimensiones de la vulnerabilidad) no solo permiten evaluar la vulnerabilidad de manera integral, sino que son un insumo para análisis de riesgo holísticos.

Aunque este informe no tiene alcance para realizar un análisis de vulnerabilidad social, se realizó un análisis preliminar espacial del indicador de pobreza multidimensional (IPM) (DANE, 2018) utilizándolo como proxy de la vulnerabilidad social. Esta es una suposición que implica varias simplificaciones: (i) se considera que el índice de pobreza multidimensional puede condensar toda la información que determina la variabilidad espacial de la vulnerabilidad social; y (ii) se asume que el indicador desarrollado en el 2018 continúa vigente en el año 2021. Estas suposiciones conllevan a limitaciones, entre ellas: (i) la vulnerabilidad social también debería incluir aspectos sobre las capacidades de la sociedad para manejar y resistir el impacto de una amenaza, es decir, debería incluir aspectos de resiliencia de la sociedad, este aspecto no es explícitamente medido por el IPM y requiere análisis detallados que deberían llevarse a cabo posteriormente; y (ii) el IPM podría no capturar las condiciones de pobreza y privaciones en 2021, particularmente luego de los impactos del COVID-19, sin embargo la actualización del indicador está fuera del alcance de este análisis.

Por las limitaciones expuestas, el análisis presentado en este capítulo debe ser considerado como preliminar y a ser complementado con información más reciente y con otros indicadores que capturen otras dimensiones de la vulnerabilidad.

Debido a la alta resolución del análisis, se realizó una búsqueda preliminar de indicadores disponibles como mínimo a nivel de manzana, esto debido a que la cuenca de la quebrada Chiguaza tiene solo 18km² y unidades más grandes que la manzana no permiten identificar suficiente variabilidad en los parámetros. A esta escala, la información disponible más relevante es el IPM calculado por el DANE con los datos censales de 2018. El IPM evalúa los resultados de satisfacción (o no privación) que tiene un individuo respecto a ciertas características que se consideran vitales como salud, educación, empleo, entre otras. La medición indirecta evalúa la capacidad de adquisición de bienes y servicios que tienen los hogares (DANE, 2020). La Medida de Pobreza Multidimensional está conformada por cinco dimensiones (DANE, 2020):

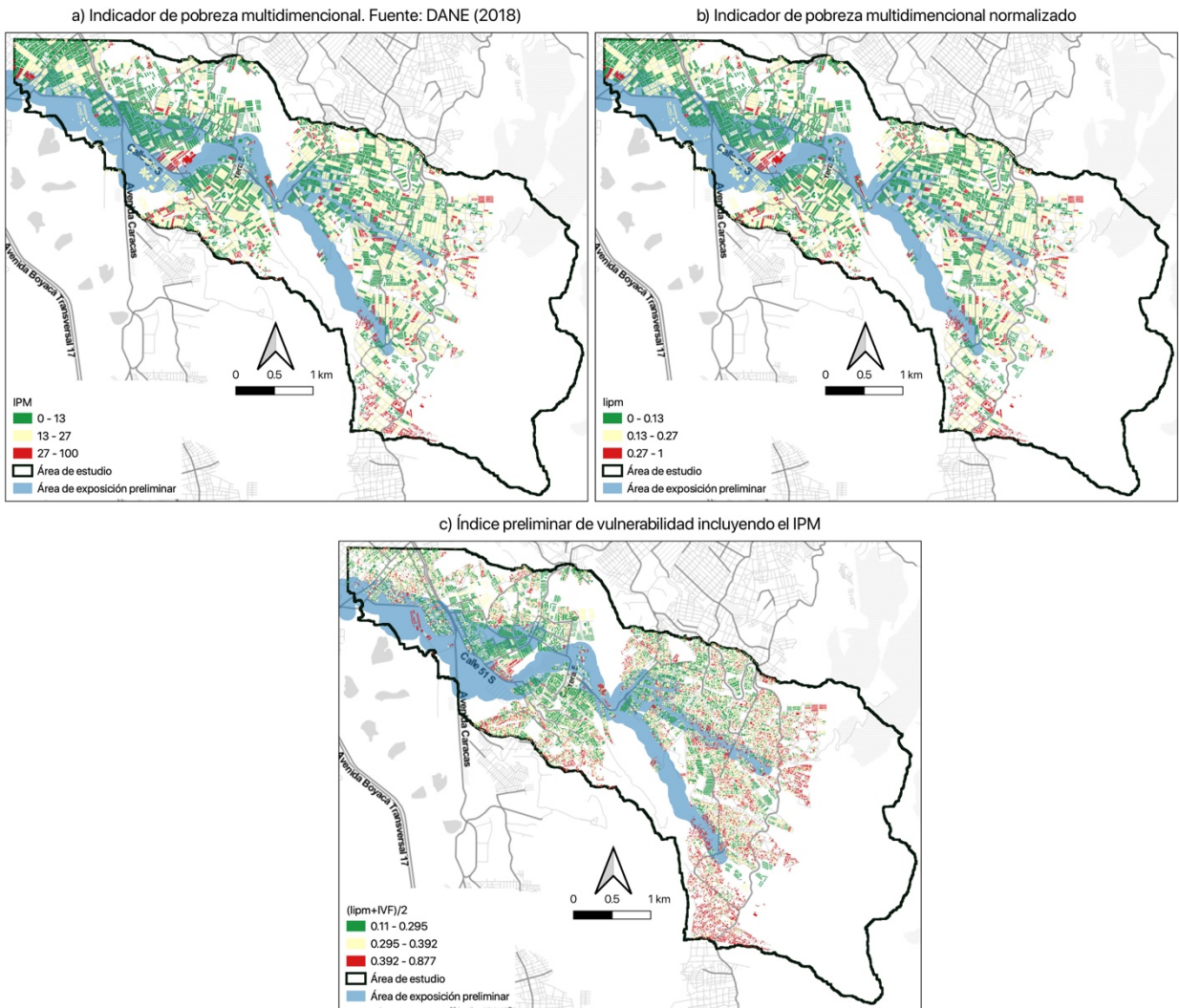
- Condiciones educativas del hogar: integra los indicadores de logro educativo y analfabetismo.
- Condiciones de la niñez y la juventud: integra los indicadores inasistencia escolar, rezago escolar, barreras de acceso a servicios para el cuidado de la primera infancia y trabajo infantil.
- Salud: indicadores de aseguramiento a salud y barreras de acceso a servicios de salud.
- Trabajo: integra los indicadores de tasa de dependencia económica y trabajo informal.
- Condiciones de la vivienda y acceso a servicios públicos domiciliarios: integra los indicadores de acceso a fuente de agua mejorada, inadecuada eliminación de excretas, material de pisos inadecuados, material de paredes exteriores inadecuado y hacinamiento crítico.

Estas dimensiones e indicadores capturan muchos de los criterios que se han utilizado para cuantificar la vulnerabilidad social, particularmente los relacionados con la fragilidad socio-económica¹³ (Cardona, 2001). Sin embargo, para futuros análisis aspectos demográficos (distribución por edades), de género y composición de la familia podrían ayudar a complementar la evaluación de fragilidad socioeconómica. Lo mismo ocurre para la medición de la resiliencia, para lo cual medir la cohesión social, el nivel de organización de las comunidades, la capacidad de respuesta y el conocimiento del riesgo podrían ser de utilidad (Lundgren y Jonsson, 2012). Sin embargo, existe un gran reto en obtener indicadores a la escala de detalle con la cual se está desarrollando el análisis. Con una unidad mínima de análisis de manzana, se requiere más investigación para revisar que tipo de información podría complementar el IPM que tenga una medición factible y que pueda ser monitoreada en el tiempo. Por ahora el análisis subsiguiente se concentrará en el IPM bajo las limitaciones establecidas.

La Figura 39 (a) muestra el IPM asignado a las construcciones (la información está originalmente a nivel de manzana, pero se asignó a cada construcción). El indicador fue normalizado con una normalización max-min (Ecuación 1) y finalmente se combinó con el IVF mediante un promedio. Los resultados muestran que los valores de vulnerabilidad combinada más altos se localizan en construcciones dispersas en toda la cuenca, aunque es posible identificar zonas en la cuenca alta y media donde predominan valores altos de vulnerabilidad donde se combinan condiciones de pobreza, viviendas de 1 piso y sistemas estructurales menos resistentes. Es importante mencionar, que los indicadores son una medida relativa de la vulnerabilidad, por lo cual no debe interpretarse que las viviendas con valores bajos del indicador no son vulnerables, solo que son menos vulnerables que las que tienen valores medios y altos.

¹³ La fragilidad socio-económica se refiere a la predisposición que surge como resultado del nivel de marginalidad y segregación social del asentamiento humano y sus condiciones de desventaja y debilidad relativa por factores socioeconómicos (Cardona, 2001).

Figura 39. a) Indicador de pobreza multidimensional (IPM); b) Indicador de pobreza multidimensional normalizado; y c) Índice preliminar de vulnerabilidad.



Fuente de IPM: DANE (2018)

Nota: Los rangos de valores utilizados para visualizar los indicadores corresponden a una identificación automática de los límites utilizando "natural jens"

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Como conclusión de la revisión de información disponible, existen unas limitaciones importantes en la ciudad de Bogotá en cuanto a información de daños y desarrollo de curvas de daño para inundaciones y avenidas torrenciales. Por lo anterior, este estudio realizó una revisión de estudios internacionales e identificó cómo estos estudios podrían aplicarse a los atributos de las viviendas en la quebrada Chiguaza. Sin embargo, las incertidumbres son altas y se recomienda que a futuro se recopile información de daño y se avance en el conocimiento de la vulnerabilidad de las construcciones existentes en Bogotá ante inundaciones y avenidas torrenciales.
- Debido a la falta de información de la vulnerabilidad de las personas, el análisis de riesgo por inundación y avenidas torrenciales en la quebrada Chiguaza tendrá que limitarse a estimar la exposición de personas sin llegar a estimaciones de muertes o heridos. Se recomienda que este paso se adopte en el futuro cuando se cuente con más información y puedan desarrollarse modelos de riesgo para la vida de las personas ante este tipo de amenazas.
- El estado de conocimiento actual implica limitaciones importantes en el entendimiento del comportamiento de las estructuras típicas de la cuenca de la quebrada Chiguaza. Avanzar en el desarrollo de curvas de vulnerabilidad específicas para la zona y para la ciudad de Bogotá contribuirá a la reducción de la incertidumbre en la evaluación del riesgo.
- Aunque se identificó un grupo de curvas de vulnerabilidad que podrían ser aplicables a la quebrada Chiguaza, no es posible hacer una verificación con información de daños. Es muy importante que a futuro la información de daños en las viviendas e infraestructura expuesta se documente para construir curvas de vulnerabilidad propias de la ciudad de Bogotá y que además permita su validación.
- Mientras se recopila información o se desarrollan curvas propias para la ciudad de Bogotá se recomienda utilizar las curvas aquí recopiladas bajo el entendimiento de las limitaciones que tienen y la incertidumbre que conllevan. Se recomienda que durante los análisis de riesgo se evalúe la sensibilidad de resultados ante el uso de diferentes curvas de daño.
- El desarrollo de curvas de vulnerabilidad no debería limitarse a las viviendas. Si bien estos son los elementos expuestos que más existen en la zona inundable, también es necesario estudiar la vulnerabilidad de otra infraestructura y los daños indirectos. Esto requerirá el desarrollo de estudios adicionales en el futuro.
- Existen grandes limitaciones en las curvas de vulnerabilidad disponibles en la literatura. Una en particular, es el uso de un solo parámetro de intensidad (generalmente la profundidad de flujo). Estudios futuros deberían buscar incluir otros parámetros relevantes como la velocidad y duración bajo las condiciones de la ciudad de Bogotá.
- Para el desarrollo del IVF se realizó una revisión de literatura con experiencias internacionales en la construcción de indicadores de vulnerabilidad ante inundaciones súbitas y flujos de detritos. Las variables utilizadas corresponden a las identificadas como más relevantes en la cuenca de la quebrada Chiguaza y con disponibilidad en toda el área de estudio. Sin embargo, a futuro otras variables pueden ser involucradas a medida que se cuente con mayor y mejor información de tal forma que el IVF pueda ser complementado. De la misma forma, la asignación de pesos se realizó mediante la compilación de información disponible en la literatura científica, reflejando ejercicios de criterio experto realizados en otros lugares del mundo que además se complementó con el criterio de la autora de este documento. Se recomienda que a futuro se revisen los

pesos asignados y se realicen los ajustes de tal forma que se refleje el avance en el conocimiento de la vulnerabilidad física de la ciudad de Bogotá.

- Para clasificar el IVF se utilizaron 3 grupos que pudieron ser asociados a valores del IVF altos, medios y bajos. Los valores del IVF altos corresponden a construcciones de un solo piso con sistemas estructurales poco resistentes y porcentajes de perímetro no colindante con mediana por encima del 50%. Los valores de IVF medios corresponden a sistemas estructurales medianamente resistentes, de un solo piso y perímetros no colindantes inferiores al 25% en su mayoría. Los valores de IVF bajos corresponden a viviendas con sistemas estructurales variados de más de un piso y con perímetros no colindantes inferiores al 40% en su mayoría. Aunque los valores altos del IVF están distribuidos en toda la cuenca, hay una mayor concentración en la zona de confluencia de la quebrada Chiguaza y el río Tunjuelo (barrios Tunjuelito y San Benito), la cuenca alta y el sur oriente de la cuenca, esto se debe a que es en estas zonas donde se concentran las viviendas con menores pisos, sistemas estructurales menos resistentes y construcciones más aisladas unas de otras.
- La vulnerabilidad social es fundamental para entender los impulsores del riesgo y por lo tanto fundamental para su gestión. En este informe se presenta una exploración inicial con el IPM pero se requiere fortalecer la investigación de la evaluación de la vulnerabilidad social, identificar indicadores a escalas de detalle y evaluar la resiliencia.
- La combinación del IVF con el IPM mostró que los valores de vulnerabilidad combinada más altos se localizan en construcciones dispersas en toda la cuenca, aunque es posible identificar zonas en la cuenca alta y media donde predominan valores altos de vulnerabilidad donde se combinan condiciones de pobreza, viviendas de 1 piso y sistemas estructurales menos resistentes. Es importante mencionar, que los indicadores son una medida relativa de la vulnerabilidad, por lo cual no debe interpretarse que las viviendas con valores bajos del indicador no son vulnerables, solo que son menos vulnerables que las que tienen valores medios y altos.
- En este análisis se ha estimado el valor de los elementos existentes en la cuenca y en el área preliminar expuesta mediante el uso del avalúo catastral y comercial. Sin embargo, se recomienda que se avance en el análisis de los valores de reemplazo de los elementos. Este avance deberá ser consistente con la evaluación de riesgo de otras amenazas como la sísmica.
- Se recomienda avanzar en el análisis de los contenidos expuestos de tal forma que puedan obtenerse curvas de vulnerabilidad de contenidos propias para la ciudad de Bogotá en las áreas específicas de los estudios de inundaciones y avenidas torrenciales.

11. REFERENCIAS

Arrighi, C. *et al.* (2020) 'Empirical flash flood vulnerability functions for residential buildings', *SN Applied Sciences*, 2(5). doi: 10.1007/s42452-020-2696-1.

Azmeri, A. and Isa, A. H. (2018a) 'An analysis of physical vulnerability to flash floods in the small mountainous watershed of Aceh Besar Regency, Aceh province, Indonesia', *Jamba: Journal of Disaster Risk Studies*, 10(1). doi: 10.4102/jamba.v10i1.550.

Azmeri, A. and Isa, A. H. (2018b) 'An analysis of physical vulnerability to flash floods in the small mountainous watershed of Aceh Besar Regency, Aceh province, Indonesia', *Jamba: Journal of Disaster Risk Studies*, 10(1). doi: 10.4102/jamba.v10i1.550.

Baró-Suárez, J. E. *et al.* (2011) 'Costo má probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México', *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*, 11(3). Available at: https://www.researchgate.net/publication/277313290_Costo_mas_probable_de_danos_por_inundacion_en_zonas_habitacionales_de_Mexico.

Birkmann, J. (2006) *Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies*, *Journal Of Homeland Security And Emergency Management*. Edited by U. N. U. Press. bepress.

Birkmann, J. *et al.* (2013) 'Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework', *Natural Hazards*, 67(2), pp. 193–211. doi: 10.1007/s11069-013-0558-5.

Cammerer, H., Thieken, A. H. and Lammel, J. (2013) 'Adaptability and transferability of flood loss functions in residential areas', *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1(4), pp. 3485–3527. doi: 10.5194/nhessd-1-3485-2013.

Cardona, O. D. (2001) *Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Congreso de Colombia (2012) *Ley No 1523 de 2012*. Available at: http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Normatividad/LEY_1523_DEL_24_DE_ABRIL_DE_2012.pdf.

DANE (2018) *Pobreza multidimensional*. Available at: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/pobreza-multidimensional> (Accessed: 9 March 2022).

DANE (2020) 'Medida de Pobreza Multidimensional Municipal de Fuente Censal'. Available at: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/condiciones_vida/pobreza/2018/informacion-censal/bt-censal-pobreza-municipal-2018.pdf.

Eidsvig, U. M. K. *et al.* (2014) 'Quantification of model uncertainty in debris flow vulnerability assessment', *Engineering Geology*, 181, pp. 15–26. doi: 10.1016/j.enggeo.2014.08.006.

Estrategias de Trading (2020) *Algoritmos de Data Mining para agrupar datos – Clustering Jerárquico*. Available at: <https://estrategiastrading.com/clustering-jerarquico/>.

Ettinger, S. *et al.* (2016) 'Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression', *Journal of Hydrology*, 541, pp. 563–581. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.017.

Flood Hazard Research Centre (2010) 'Multi-Coloured Handbook'.

Fuchs, S. *et al.* (2019) 'Recent advances in vulnerability assessment for the built environment exposed to torrential hazards: Challenges and the way forward', *Journal of Hydrology*, pp. 587–595. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.067.

Fuchs, S., Heiss, K. and Hübl, J. (2007) 'Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment', *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(5), pp. 495–506. doi: 10.5194/nhess-7-495-2007.

Getis, A. and Ord, J. K. (1992) 'The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics', *Geographical Analysis*, 24(3), pp. 189–206. doi: 10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.

Godfrey, A. *et al.* (2015) 'Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach - An application in Nehoiu Valley, Romania', *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 13, pp. 229–241. doi: 10.1016/j.ijdrr.2015.06.001.

HNFMSSC (2006) *Designing Safer Subdivisions. Guidance On Subdivision Design In Flood Prone Areas.* Parramatta. Available at: https://www.ses.nsw.gov.au/media/2249/subdivision_guidelines.pdf.

Huizinga, J., de Moel, H. and Szewczyk, W. (2017) *Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines, Joint Research Centre (JRC).* Available at: https://ec.europa.eu/jrc%0Ahttp://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC105688/global_flood_depth-damage_functions__10042017.pdf.

IDIGER (2021) 'EVALUACIÓN DE RIESGO POR AVENIDA TORRENCIAL DE LA QUEBRADA LIMAS Análisis de vulnerabilidad. Ciudad Bolívar. Bogotá. Colombia'.

IDIGER (2022a) 'ACTUALIZACIÓN BASE DE DATOS DE ELEMENTOS EXPUESTOS, INSUMO BASE PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD PARA LA QUEBRADA CHIGUAZA'.

IDIGER (2022b) 'Informe técnico de campo y oficina con los resultados del proyecto, puntos temporales, levantamientos batimétricos, levantamientos topográficos complementarios y elaboración de modelo geoidal local, registros fotográficos de todas las actividades, modelo '.

JBA (2019) *Evaluación del riesgo de inundación y la situación costera del Río Tocumen Priorización de infraestructura híbrida para la reducción del riesgo de inundación en la zona urbana de la Ciudad de Panamá.* Panamá, Panamá.

JICA (2006) *Estudio de monitoreo y sistemas de alerta temprana de deslizamientos e inundaciones en Bogotá y Soacha.* Bogotá, Colombia.

Kang, H. sub and Kim, Y. tae (2016) 'The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events', *Natural Hazards*, 80(3), pp. 1475–1493. doi: 10.1007/s11069-015-2032-z.

Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M. and Keiler, M. (2012) 'Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology', *Applied Geography*, 32(2), pp. 577–590. doi: 10.1016/j.apgeog.2011.07.002.

Karagiorgos, K. *et al.* (2016) 'Assessing flash flood vulnerability using a multi-vulnerability approach', in *E3S Web of Conferences*. doi: 10.1051/e3sconf/20160708004.

Lavell, A. *et al.* (2012) 'Climate change: New dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience', in *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 25–64. doi: 10.1017/CBO9781139177245.004.

Leal, M. *et al.* (2021) 'Physical vulnerability assessment to flash floods using an indicator-based methodology based on building properties and flow parameters', *Journal of Flood Risk Management*, 14(3). doi: 10.1111/jfr3.12712.

Lo, W. C., Tsao, T. C. and Hsu, C. H. (2012) 'Building vulnerability to debris flows in Taiwan: A preliminary study', *Natural Hazards*, 64(3), pp. 2107–2128. doi: 10.1007/s11069-012-0124-6.

Lundgren, L. and Jonsson, A. (2012) 'Assessment of social vulnerability: a literature review of vulnerability related to climate change and natural hazards', *CSPR Briefing*, 9, p. 20. Available at: <http://www.cspr.se/briefings/1.358869/CSPRBriefing9.pdf>.

Malgwi, M. B., Fuchs, S. and Keiler, M. (2020) 'A generic physical vulnerability model for floods: Review and concept for data-scarce regions', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), pp. 2067–2090. doi: 10.5194/nhess-20-2067-2020.

Marvi, M. T. (2020) 'A review of flood damage analysis for a building structure and contents', *Natural Hazards*, pp. 967–995. doi: 10.1007/s11069-020-03941-w.

Mason, M. *et al.* (2010) *Analysis of damage to buildings following the 2010 – 11 Eastern Australia floods*. National Climate Change Adaptation Facility. Available at: https://nccarf.edu.au/wp-content/uploads/2019/03/Mason_2012_Analysis_of_damage_to_buildings_following.pdf.

Nofal, O. M., van de Lindt, J. W. and Do, T. Q. (2020) 'Multi-variate and single-variable flood fragility and loss approaches for buildings', *Reliability Engineering and System Safety*, 202. doi: 10.1016/j.ress.2020.106971.

Olesen, L., Löwe, R. and Arnbjerg-Nielsen, K. (2017) *Flood Damage Assessment Literature review and recommended procedure, Telcom Report (English Edition)*. Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities. Available at: https://watersensitivecities.org.au/wp-content/uploads/2017/03/IN_PC956_B4-1_Flood_Damage_web.pdf.

Ordaz, M., Torres, M. A. and Domínguez, R. (2013) 'VULNERABILIDAD Y RIESGO POR INUNDACIONES', *Instituto de Ingeniería, UNAM*.

Pistrika, A., Tsakiris, G. and Nalbantis, I. (2014) 'Flood Depth-Damage Functions for Built Environment', *Environmental Processes*, 1(4), pp. 553–572. doi: 10.1007/s40710-014-0038-2.

Prieto, J. A. *et al.* (2018) 'Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter', *Engineering Geology*, 239, pp. 144–157. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.03.014.

Prieto, J. C. (2018) *Modelación de escenarios de riesgo sísmico y estimación de daños - conformación y mantenimiento actualizado de las bases de datos requeridas para estimaciones de riesgo sísmico - Documento técnico de soporte*. Bogotá, Colombia.

Reese, S. and Ramsay, D. (2010) *RiskScape: Flood Fragility Methodology, NIWA Technical Report: WLG2010-45*. Available at: <https://www.wgtn.ac.nz/sgees/research-centres/documents/riskscape-flood-fragility-methodology.pdf>.

Romali, N. S. *et al.* (2015) 'Flood Damage Assessment: A Review of Flood Stage–Damage Function Curve', in *ISFRAM 2014*, pp. 147–159. doi: 10.1007/978-981-287-365-1_13.

Salas, M. (2011) *Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas*. Mexico D.F. Available at: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/203.pdf>.

SNGRD (2017) *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos*

Amenazantes. Bogotá, Colombia. Available at:
<https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf;jsessionid=7FA98F767F555A12649406FEA08CD870?sequence=2>.

Su, M. and Kang, J. (2005) 'A grid-based GIS approach to regional flood damage assessment', *Journal of Marine Science and Technology*, 13(3), pp. 184–192. Available at: <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/13-3/184-192.pdf> (Accessed: 12 September 2012).

Tarbotton, C. *et al.* (2015) 'The use of empirical vulnerability functions to assess the response of buildings to tsunami impact: Comparative review and summary of best practice', *Earth-Science Reviews*, pp. 120–134. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.01.002.

Thouret, J. C. *et al.* (2014) 'Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: The case of Arequipa (Peru)', *Natural Hazards*, 73(3), pp. 1771–1815. doi: 10.1007/s11069-014-1172-x.

Totschnig, R. and Fuchs, S. (2013) 'Mountain torrents: Quantifying vulnerability and assessing uncertainties', *Engineering Geology*, 155, pp. 31–44. doi: 10.1016/j.enggeo.2012.12.019.

UNAL (2006) 'Análisis e investigación de procesos de flujos de detritos como eventos generadores de riesgo en la cuenca alta del río San Cristóbal'.

Vogel, C. and O'Brien, K. (2004) 'Vulnerability and global environmental change: Rhetoric and reality. An Information Bulletin on Global Environmental Change and Human Security.' Available at: <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/39859/IDL-39859.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Wu, X. and Guo, J. (2021) 'Urban Flood Depth-Economic Loss Curves and Their Amendment Based on Resilience: Evidence from Lizhong Town in Lixia River and Houbai Town in Jurong River of China', in *Economic Impacts and Emergency Management of Disasters in China*, pp. 191–219. doi: 10.1007/978-981-16-1319-7_7.

Zhang, S. *et al.* (2018) 'Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows', *Engineering Geology*, 247, pp. 145–158. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.10.017.

ANEXO A. Procedimiento para la asignación de tipología estructural

La tipología de los elementos expuestos fue construida tomando como base el proceso llevado a cabo para la construcción de la base de datos de elementos expuestos para la evaluación de riesgo sísmico, descrito en Prieto (2018). Se partió de la base de datos desarrollada por IDIGER (2022a). La información disponible en IDECA que fue utilizada para generar la tipología y demás atributos de la base de datos de exposición (ver Tabla 2 para una descripción de los atributos de la base de datos de exposición generados a partir de la información disponible) se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Información disponible para la construcción de la base de datos de exposición

Formato	Indicador	Resolución	Campos
Archivo Shape	<p>Construcción. Bogotá D.C</p> <p>Edificación con cubierta de carácter permanente asociada a un lote destinada a proteger contra la intemperie a personas, animales o bienes.</p> <p>Entidad Unidad A. Especial de Catastro Distrital</p> <p>Fecha de actualización del contenido 25/07/2021</p> <p>Publicado 13-09-2022</p> <p>Descargado 16-09-2022 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/construccion-bogota-dc</p>	Construcción	CONCODIGO CONNPISOS CONTSEMIS CONNSOTANO CONMEJORA CONVOLADIZ CONALTURA CONELEVACI
Archivo Shape	<p>Manzana Estratificación. Bogotá D.C.</p> <p>Unidades geográficas tipo manzana las cuales se les asocia la variable de estrato socioeconómico, siendo esta, la clasificación de los inmuebles residenciales que deben recibir servicios públicos. Se realiza principalmente para cobrar de manera diferencial por estratos los servicios públicos domiciliarios, permitiendo asignar subsidios y cobrar contribuciones.</p> <p>Entidad Secretaría Distrital de Planeación</p> <p>Fecha de actualización del contenido 15/08/2019</p> <p>Descargado 16-09-2022 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/manzana-estratificacion-bogota-dc</p>	Manzana	CODIGO_MAN ESTRATO CODIGO_ZON CODIGO_CRI NORMATIVA ACTO_ADMIN NUMERO_ACT FECHA_ACTO ESCALA_CAP RESPONSABL
Tabla dbf	<p>Uso. Bogotá D.C</p> <p>Descripción y cobertura del uso predominante de las construcciones existentes a nivel de Lote para Bogotá.</p> <p>Fecha de actualización del contenido 25/07/2021</p> <p>Unidad A. Especial de Catastro Distrital</p> <p>Publicado 13-09-2022</p> <p>Descargado 16-09-2022 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/uso-bogota-dc</p>	Lote o predio	USOCLOTE USOTUSO USOAREA
Tabla dbf	<p>Predios. Bogotá D.C</p> <p>Es un inmueble no separado por otro predio público o privado, con o sin construcciones y/o edificaciones, perteneciente a personas naturales o jurídicas. El predio mantiene su unidad, aunque esté atravesado por corrientes de agua pública. Se incluyen en esta definición los baldíos, los ejidos, los vacantes, los resguardos indígenas, las reservas naturales, las tierras de las comunidades negras, la propiedad horizontal, los condominios (unidades inmobiliarias cerradas), las multipropiedades, las parcelaciones, los parques cementerios, los</p>	Lote o predio	OBJECTID PreCBarrio PreNBarrio PreCManz PreCPredio PreCCons PreCResto PreCChip

	<p>bienes de uso público y todos aquellos otros que se encuentren individualizados con una matrícula inmobiliaria, así como las mejoras por edificaciones en terreno ajeno. Resolución IGAC 070/2011</p> <p>Fecha de actualización del contenido 25/07/2021</p> <p>Unidad A. Especial de Catastro Distrital</p> <p>Publicado 13-09-2022</p> <p>Descargado 16-09-2022 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/predios-bogota-dc</p> <p>Metadatos: https://serviciosgis.catastrobogota.gov.co/arcgis/rest/services/catastro/lote/MapServer/3</p>		PreCedCata PreNupre PreTProp PreFIncorp PreClase PreDirecc PreMDirecc PreTDirecc PreDSI PreATerre PreAConst PreCZHF PreCDestin PreVetustz PreVForma PreVActual PreCUse PreAUso PreUsoPH PreUsoNPH PreUVivien PreUCalif PreFCalif PrePuntaje PreEArmaz PreEMuros PreECubier PreECons PreAFachad PreACubier PreAPisos PreACons PreBTamano PreBEnchap PreBMobili PreBCons PreCTamano PreCEnchap PreCMobili PreCConse PreCIndus PreACercha PreCIcons Barmanpre
Archivo Shape	<p>Avalúo. Bogotá D.C</p> <p>Contiene los avalúos comerciales por manzana discriminado por propiedad horizontal y no propiedad horizontal, encontrando el grupo/clase predominante a nivel de manzana teniendo en cuenta la suma de áreas de terreno a nivel de lote para cada una de las manzanas.</p> <p>Entidad Unidad A. Especial de Catastro Distrital</p> <p>Fuente La IDE de Bogotá D.C</p> <p>Licencia CC BY 4.0 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/avaluo-comercial-bogota-dc</p> <p>Fecha de actualización del contenido 01/01/2019 https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/avaluo-catastral-bogota-dc</p> <p>Fecha de actualización del contenido 31/12/2018</p> <p>Publicado 13-09-2022</p> <p>Descargado 16-09-2022</p>	Manzana	OBJECTID MANZANA_ID CP_TERR_AR AVALUO_COM AVALUO_CAT OBSERVACIO GLOBALID

Para la construcción de la base de datos no se contó con la información no pública de catastro, solo con la información disponible en IDECA lo que impone limitaciones, debido a que en IDECA no se publica la información de valor por metro cuadrado asociada a cada predio. Por lo anterior, para la asignación del valor de las construcciones se utilizó el avalúo catastral y comercial por manzana.

La representación geográfica que se utilizó para los elementos expuestos corresponde a los polígonos contenidos en la capa “construcción” (ver Tabla 9) complementada por IDIGER (2022a) con información digitalizada de la ortofoto capturada por IDIGER en 2022. Este enfoque difiere del utilizado en la base de datos de exposición creada en 2017 para el análisis del riesgo sísmico debido a que según Prieto (2018) la representación geográfica usada en ese caso fue el lote. Para el análisis de riesgo por inundación es deseable que la representación geográfica sea lo más precisa posible en cuanto a la localización espacial de las construcciones por lo que se optó por utilizar las construcciones como unidad de análisis y no los lotes.

Los campos asociados a cada construcción y que son usados para definir la tipología estructural se describen a continuación:

- Número de pisos:
 - Construcciones contenidas en la base de datos de construcciones de Catastro Distrital: corresponde al atributo CONNPISOS.
 - Construcciones no contenidas en la base de datos de Construcciones de Catastro Distrital pero que fueron identificadas con fotointerpretación de la ortofoto IDIGER 2022: el número de pisos se obtuvo por IDIGER (2022a) mediante visita de campo.
 - A través de Google Street View cuando no estaba disponible de ninguna de las dos fuentes anteriores.
- Uso:
 - Construcciones contenidas en la base de datos de construcciones de Catastro Distrital: el uso se obtuvo de la base de datos uso de Catastro Distrital. Los usos que utiliza el algoritmo para definir el sistema estructural son los siguientes: i) industrial según la clasificación de uso de Prieto (2018) (ver Tabla 10); ii) habitacional menor o igual a 3 pisos PH (uso 37 en la Tabla 11) y iii) habitacional en propiedad horizontal (uso 38 en la Tabla 11).

Tabla 10. Categoría de uso

CATEGORÍA DE USO	CÓDIGOS USO DE CATASTRO
Residencial	001, 002, 037, 038, 048, 049, 051, 052, 057, 096
Comercial y de servicios	003, 004, 005, 006, 007, 008, 020, 021, 022, 023, 024, 025, 026, 027, 029, 031, 033, 039, 040, 041, 042, 045, 046, 047, 050, 056, 060, 066, 080, 081, 082, 091, 093, 094, 095, 097, 098
Dotacional	012, 013, 014, 015, 016, 017, 018, 035, 043, 044, 053, 055, 058, 059, 062, 064, 067, 092
Industrial	009, 010, 011, 019, 028, 034, 070, 071, 072, 073, 074, 075, 076, 077
Recreacional y deportivo	030, 032, 036, 065
Sin construir	090

Fuente: Prieto (2018) tomado de Catastro Distrital

Tabla 11. Códigos de uso del suelo de catastro

CODIGO	DESCRIPCION USO	CODIGO	DESCRIPCION USO
0	Sin Uso	43	Centros Médicos en PH
1	Habitacional Menor o Igual a 3 Pisos NPH	44	Institucional PH
2	Mayor o Igual a 4 Pisos NPH o 3 Pisos PH	45	Oficinas y Consultorios PH
3	Comercio Puntual NPH o Hasta 3 Unid PH	46	Hoteles PH
4	Corredor Comercial NPH o Hasta 3 Unid PH	47	Teatros y Cinemas PH
5	Estaciones de Servicio	48	Parqueo Libre PH
6	Centro Comercial Mediano NPH	49	Parqueo Cubierto PH
7	Centro Comercial Grande NPH	50	Edificios de Parqueo PH
8	Bodega Comercial NPH	51	Deposito (Lockers) PH
9	Industria Artesanal	52	Piscinas en PH
10	Industria Mediana	53	Iglesia PH
11	Industria Grande	55	Cementerios
12	Institucional Puntual	56	Restaurantes NPH
13	Colegios y Universidades 1 a 3 Pisos	57	Área de Mezanine en PH
14	Iglesias	58	Culto Religioso en NPH
15	Oficinas y Consultorios (Oficial) NPH	59	Culto Religioso en PH
16	Colegios y Universidades 4 o Más Pisos	60	Restaurantes PH
17	Clínicas, Hospitales, Centros Médicos	62	Pista Aeropuerto
18	Instalaciones Militares	64	Aulas de Clase
19	Industria Artesanal	65	Clubes Pequeños
20	Oficinas y Consultorios NPH	66	Plazas de Mercado
21	Hoteles NPH	67	Museos
22	Depósitos de Almacenamiento NPH	70	Enramadas, Coberizos, Caneyes
23	Teatros y Cinemas NPH	71	Galpones, Gallineros
24	Edificios de Parqueo NPH	72	Establos, Pesebreras
25	Bodegas de Almacenamiento NPH	73	Cocheras, Marraneras, Porquerizas
26	Moteles, Amoblados, Residencias NPH	74	Beneficiaderos
27	Moteles, Amoblados, Residencias PH	75	Secaderos
28	Industria Mediana PH	76	Kioskos
29	Parques de Diversión	77	Silos
30	Clubes Mayor Extensión	80	Oficinas en Bodegas y/o Industrias
31	Piscinas en NPH	81	Oficina Bodega y/o Industria PH
32	Coliseos	82	Oficinas Operativas(Estaciones Servicio)
33	Bodega Económica	90	Lote en Propiedad Horizontal
34	Industria Grande PH	91	Bodega Comercial PH
35	Colegios en PH	92	Oficinas y Consultorios (Oficial) PH
36	Parques de Diversión en P.H.	93	Bodegas de Almacenamiento PH
37	Habitacional Menor o Igual a 3 Pisos PH	94	Centro Comercial Pequeño NPH
38	Habitacional en Propiedad Horizontal	95	Centro Comercial Pequeño PH
39	Comercio Puntual PH	96	Parqueo Cubierto NPH
40	Corredor Comercial PH	97	Bodega Económica (Serviteca, Esta.Servic.)
41	Centro Comercial Mediano PH	98	Deposito Almacenamiento PH
42	Centro Comercial Grande PH	999	Comodín

Fuente: Prieto (2018) tomado de Catastro Distrital

- Construcciones no contenidas en la base de datos de Construcciones de Catastro Distrital pero que fueron identificadas con fotointerpretación de la ortofoto IDIGER 2022: el uso de la construcción se obtuvo mediante visita de campo por IDIGER (2022a).
- Armazón, muros, estructura y cercas
 - Construcciones contenidas en la base de datos de construcciones de Catastro Distrital: las características de estos elementos fueron obtenidos de los campos PreEArmaz, PreEMuros, PreCIndus de la base de datos de predios de Catastro Distrital con los códigos que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Códigos de calificación según catastro de: armazón y muros

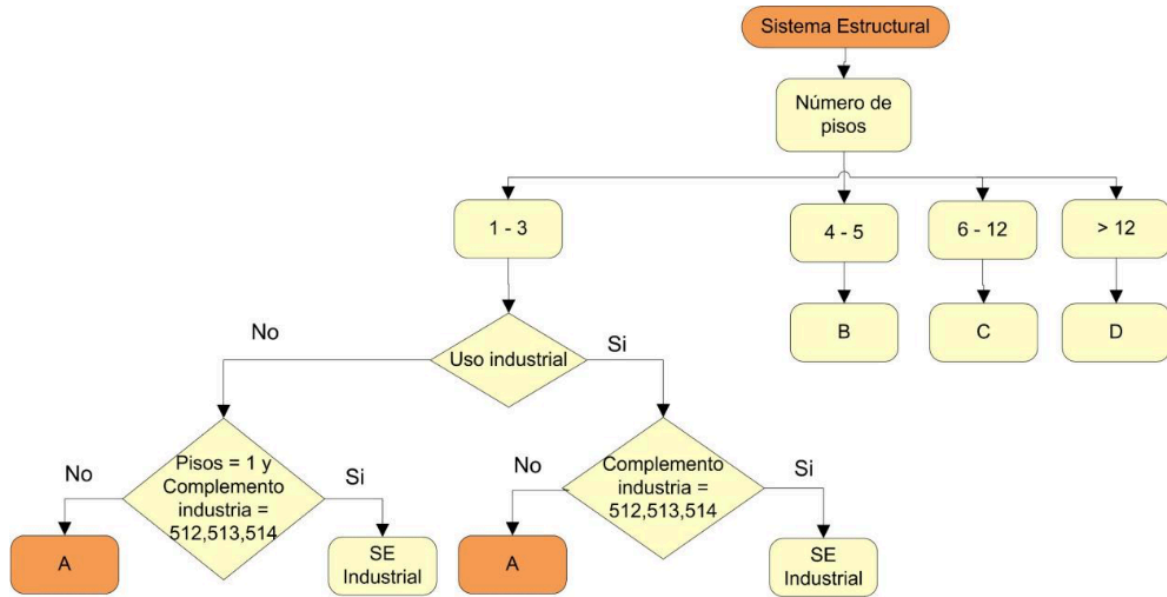
CODIGO CALIFICACION	DESCRIPCION CALIFICACION
1	Estructura
11	Armazón
111	Madera
112	Prefabricado
113	Ladrillo, Bloque
114	Concreto Hasta Tres Pisos
115	Concreto Cuatro o Más Pisos
12	Muros
121	Materiales de Desecho, Esterilla
122	Bahareque, Adobe, Tapia
123	Madera
124	Concreto Prefabricado
125	Bloque, Ladrillo
5	Complemento industria
51	Cerchas
511	Madera
512	Metálica liviana
513	Metálica mediana
514	Metálica pesada
52	Altura cerchas
521	Altura

Fuente: Prieto (2018) tomado de Catastro Distrital

- Construcciones no contenidas en la base de datos de Construcciones de Catastro Distrital pero que fueron identificadas con fotointerpretación de la ortofoto IDIGER 2022: las características de estos elementos se obtuvieron mediante visita de campo por IDIGER (2022a).
- Edad de construcción: se obtuvo del campo vetustez de la base de datos de predios de Catastro Distrital. En la base de datos existen predios que no tienen información de vetustez para los cuales el valor se tomó como desconocido. Lo mismo ocurre en el caso de las construcciones identificadas en la ortofoto IDIGER (2022) para las cuales no se cuenta con información de vetustez y resulta de alta complejidad la recopilación de ese dato en campo.
- Estratificación: el estrato para cada construcción se obtuvo de la base de datos de estrato socio económico de la Secretaría Distrital de Planeación. Para las construcciones para las cuales este dato no se encontraba disponible, se utilizó la información de estratificación a nivel de manzana. Las construcciones para las cuales no fue posible identificar el estrato de estas dos fuentes se les asignó el estrato 1 ya que corresponden mayormente a construcciones informales recientes.
- El área construida se generó de la capa de construcciones y de los polígonos digitalizados correspondientes a construcciones no contenidas en la base de datos de Catastro Distrital. Se calculó el área de cada polígono y se multiplicó por el número de pisos. Este procedimiento difiere del utilizado por Prieto (2017) ya que en la generación de la información para sismo se realizó una sumatoria por código de predio ya que esta fue la unidad de análisis escogida, mientras que para el caso de inundaciones la unidad de análisis es la construcción.

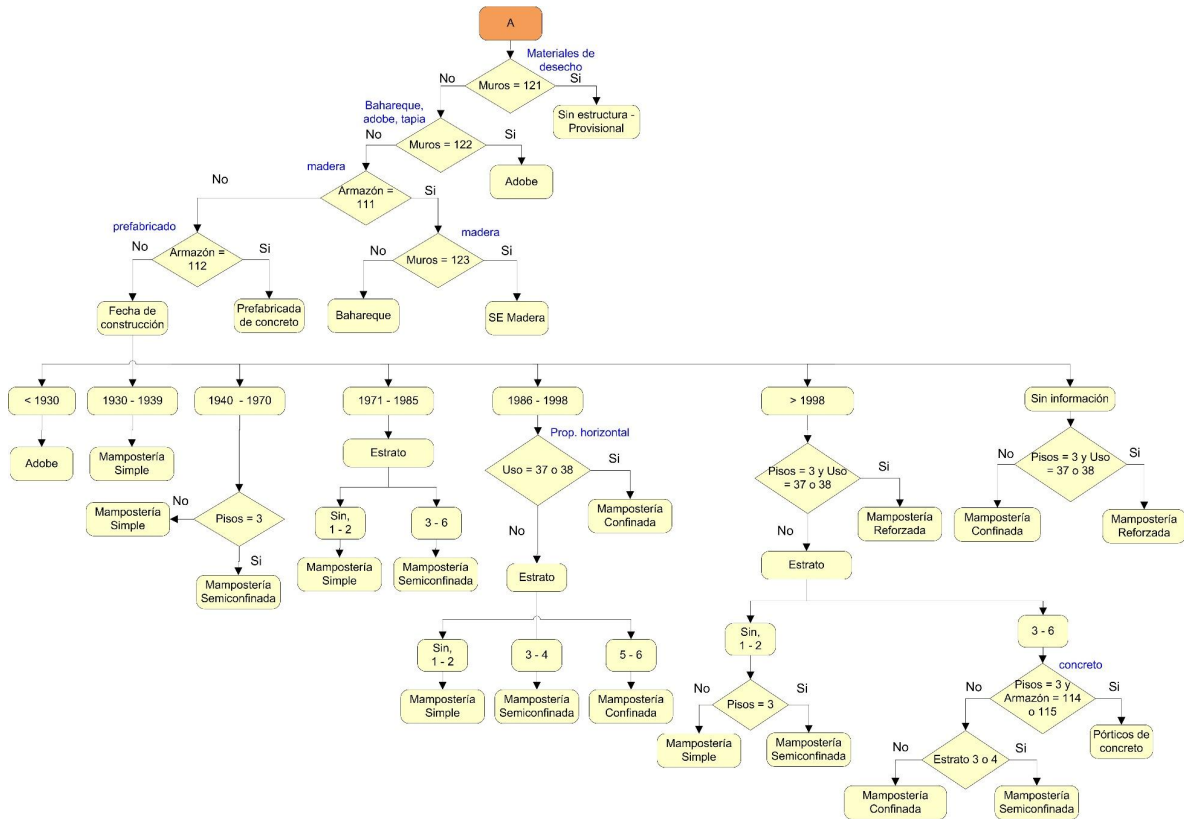
Una vez generada y organizada la información para cada construcción, se utilizó el algoritmo propuesto por Prieto (2018) para generar la tipología estructural de las construcciones. El algoritmo se muestra en la Figura 40 a Figura 43.

Figura 40. Parte inicial del algoritmo para generar el sistema estructural de las construcciones



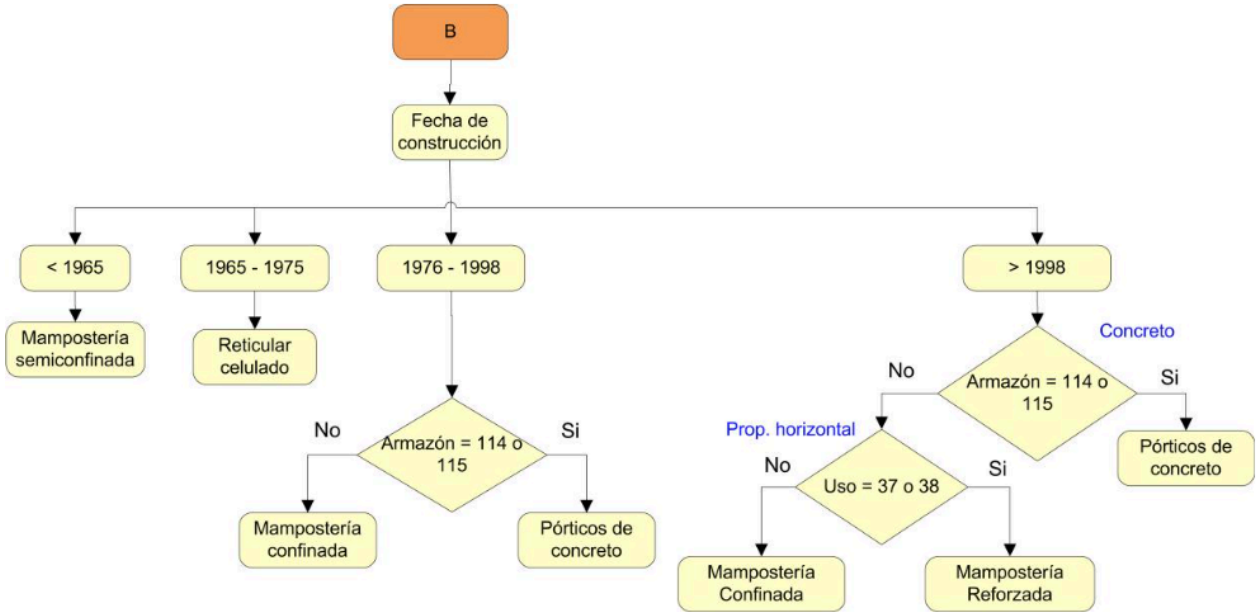
Fuente: Prieto (2018)

Figura 41. Diagrama modificado de asignación de Sistema estructural parte A



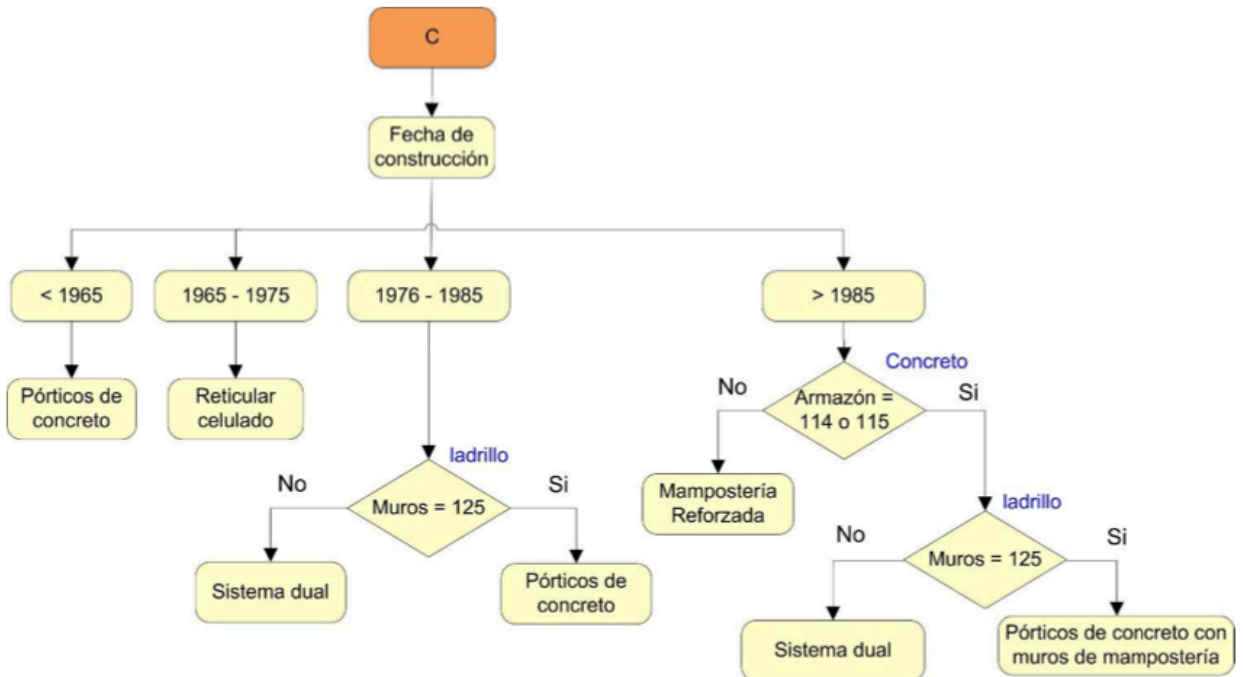
Fuente: Prieto (2018)

Figura 42. Algoritmo modificado para generar sistema estructural – Parte B



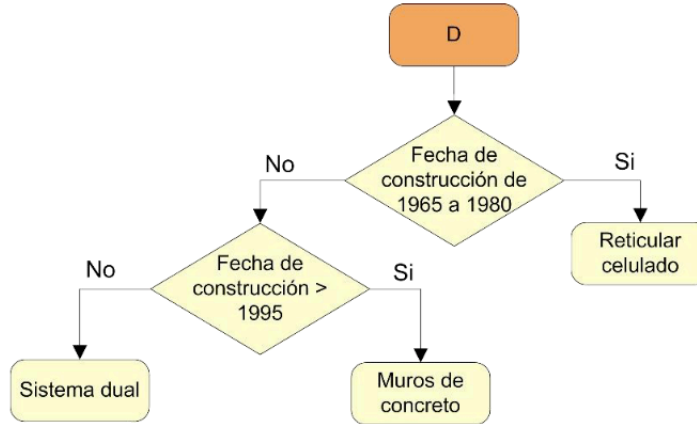
Fuente: Prieto (2018)

Figura 43. Diagrama modificado de asignación de sistema estructural – Parte C



Fuente: Prieto (2018)

Figura 44. Diagrama modificado de asignación de sistema estructural – Parte D



Fuente: Prieto (2018)

Los sistemas estructurales resultantes de la aplicación del algoritmo corresponden a los mostrados en la Tabla 13.

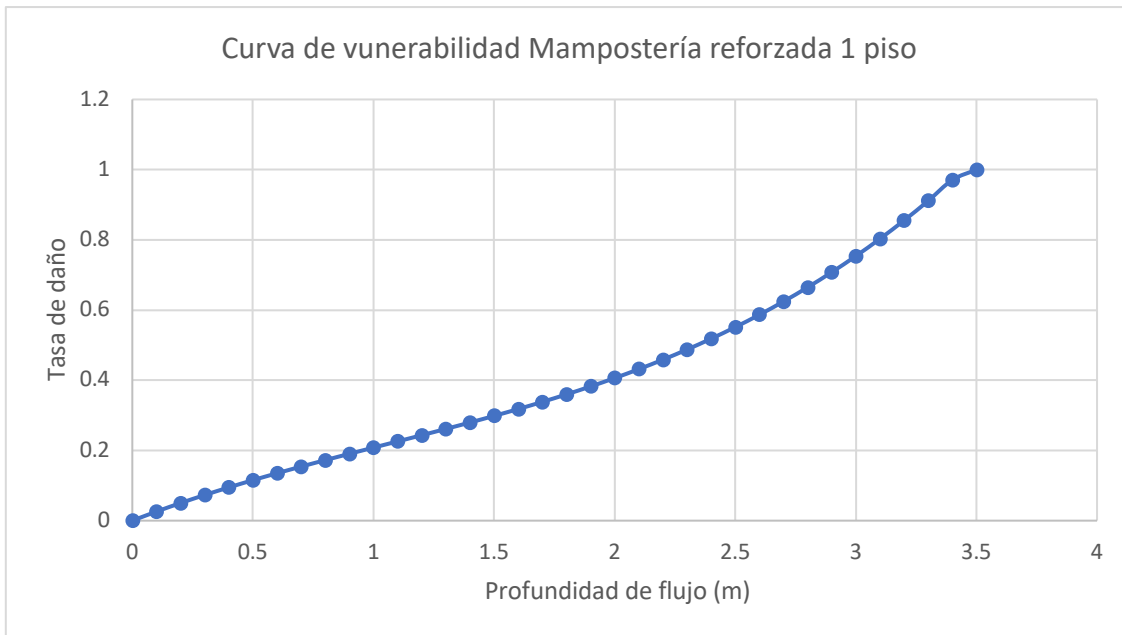
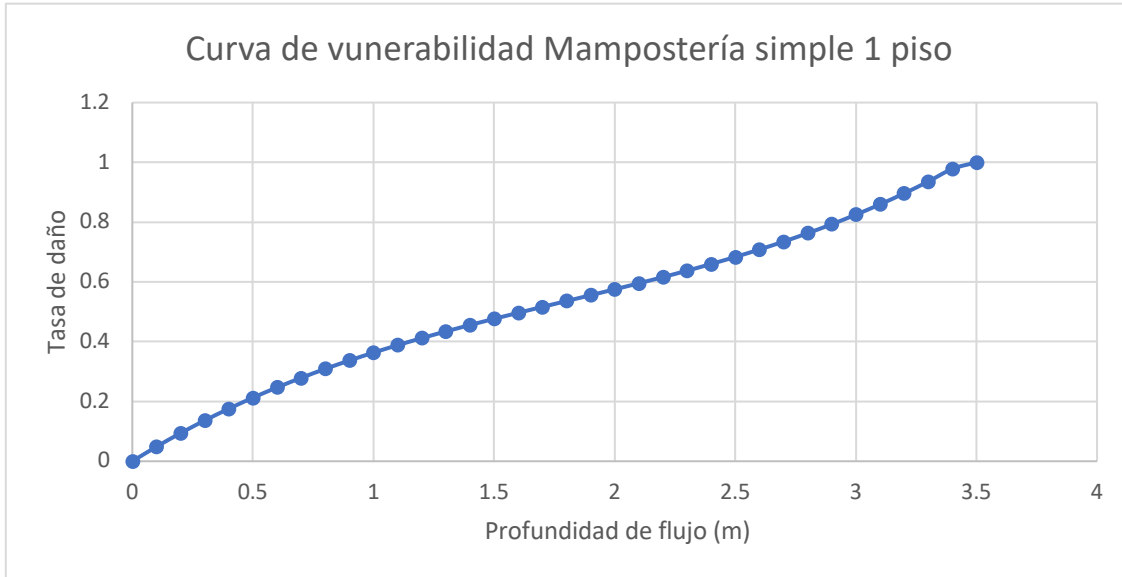
Tabla 13. Sistemas estructurales

SISTEMA ESTRUCTURAL
Adobe
Bahareque
Estructura Prefabricada De Concreto
Mampostería Simple
Mampostería Semiconfinada
Mampostería Confinada
Losa Columna
Pórticos de Concreto Reforzado
Pórticos de Concreto con Muros Mampostería
Pórticos de Concreto con Muros Concreto
Industrial Con Cubierta Ligera

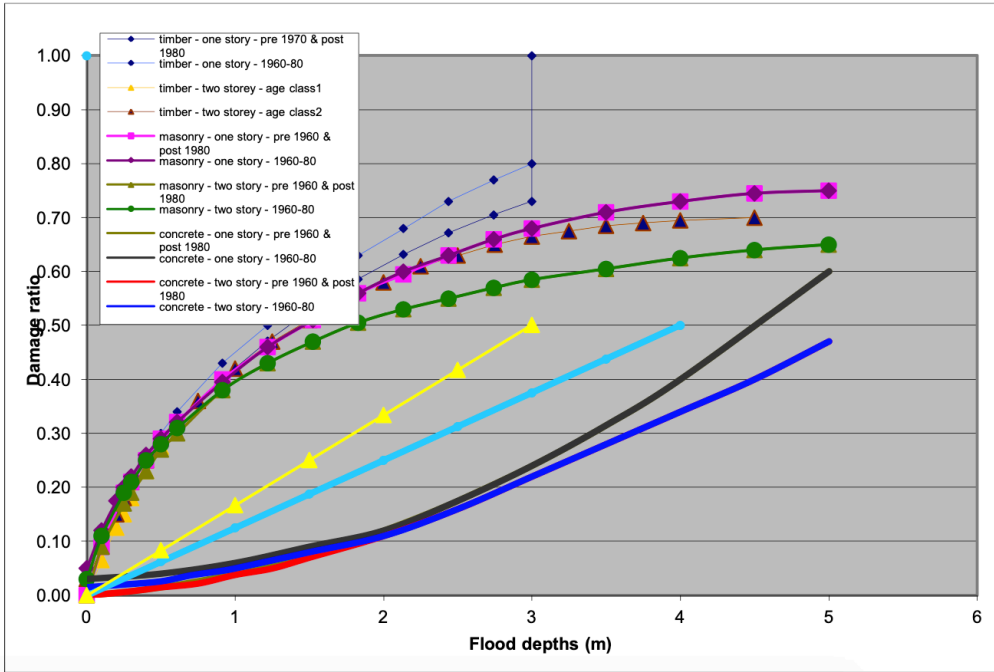
Fuente: Prieto (2018)

ANEXO B. Recopilación de curvas de vulnerabilidad existentes

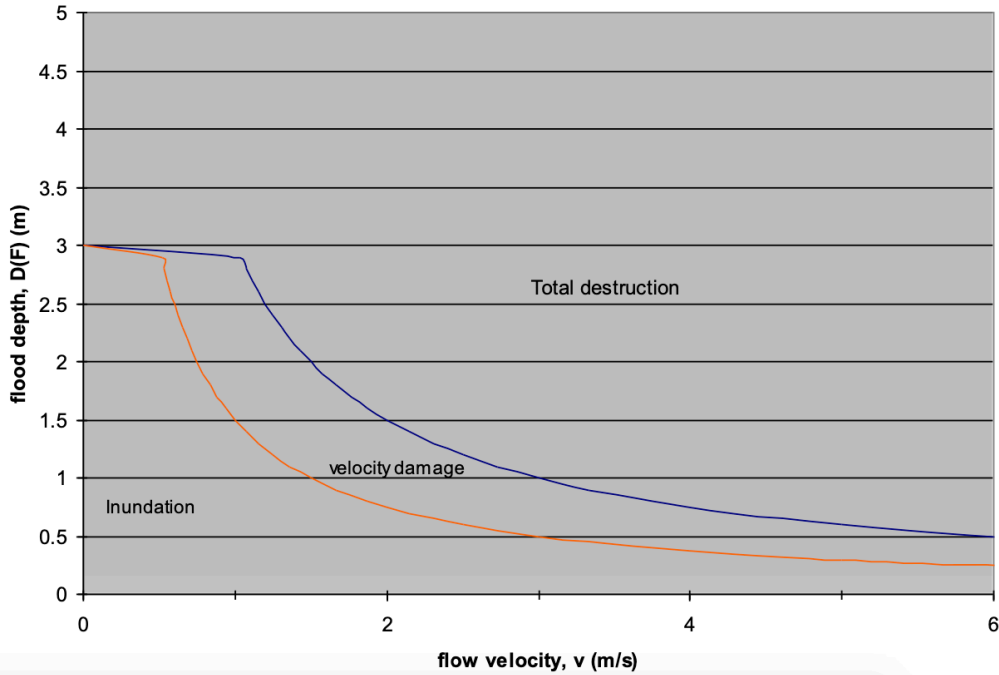
B.1 CURVAS DE VULNERABILIDAD DESARROLLADAS POR LO ET AL. (2012)



B.2 CURVAS DE VULNERABILIDAD DESARROLLADAS POR EL PROYECTO RISKSCAPE (REESE AND RAMSAY, 2010)

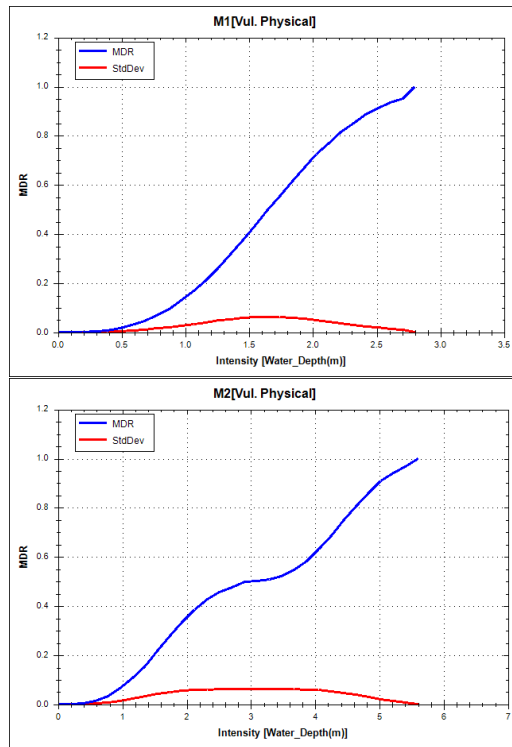


Timber/weatherboard

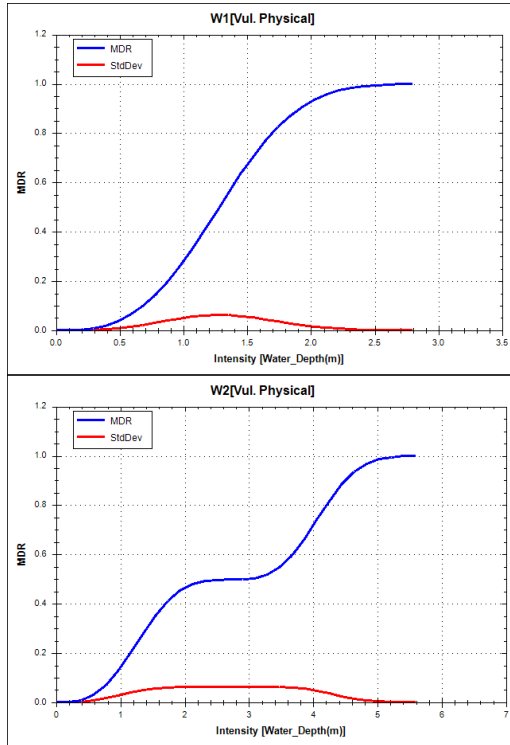


B.3 CURVAS DESARROLLADAS POR CAPRA Y UTILIZADAS POR JBA (2019) EN CIUDAD DE PANAMÁ

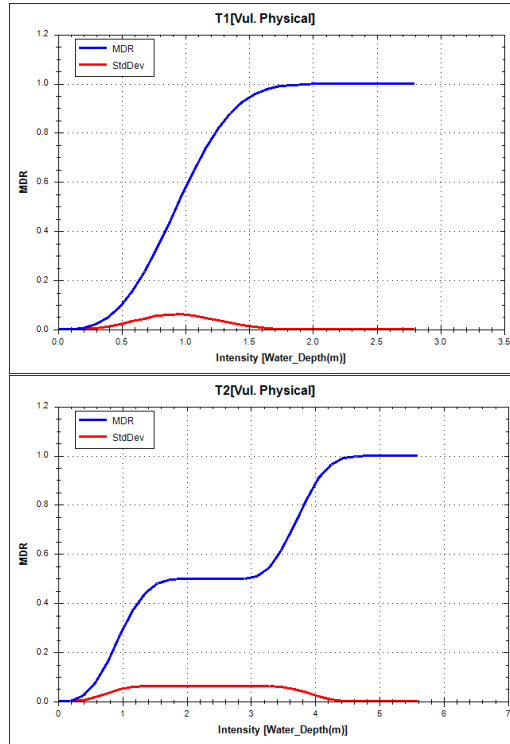
M1 - Edificaciones de mampostería de 1 piso y M2 - Edificaciones de mampostería de 2 pisos.



W1 - Edificaciones de madera de 1 piso y W2 - Edificaciones de madera de 2 pisos.

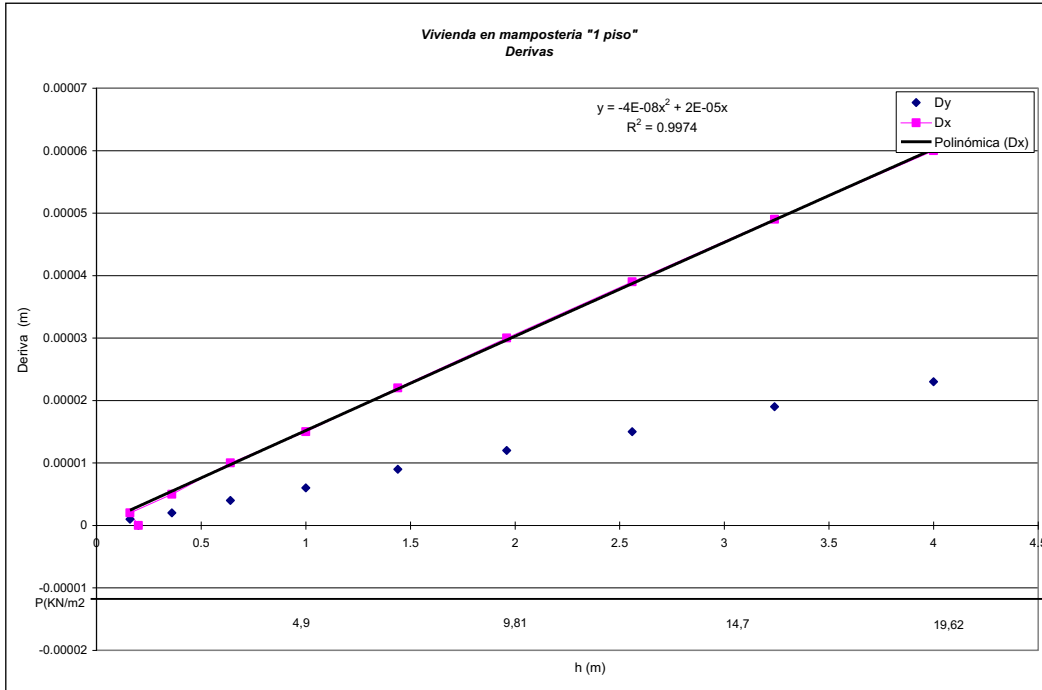


T1 - Edificaciones de tierra de 1 piso y T2 - Edificaciones de tierra de 2 pisos.

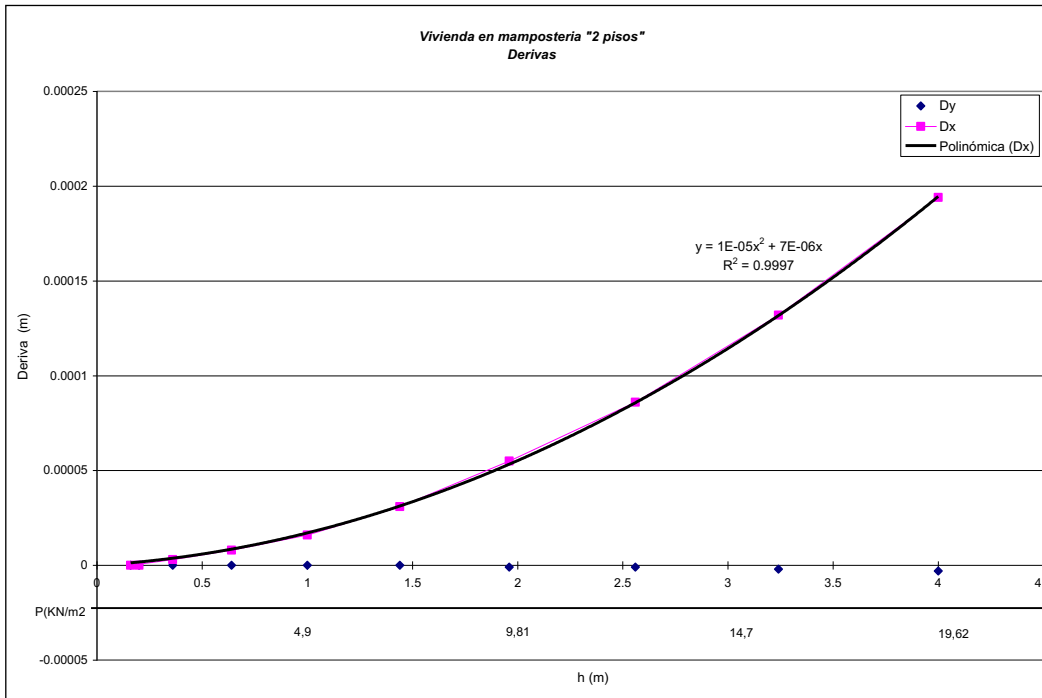


B.4 CURVAS DESARROLLADAS POR LA UNAL (2006)

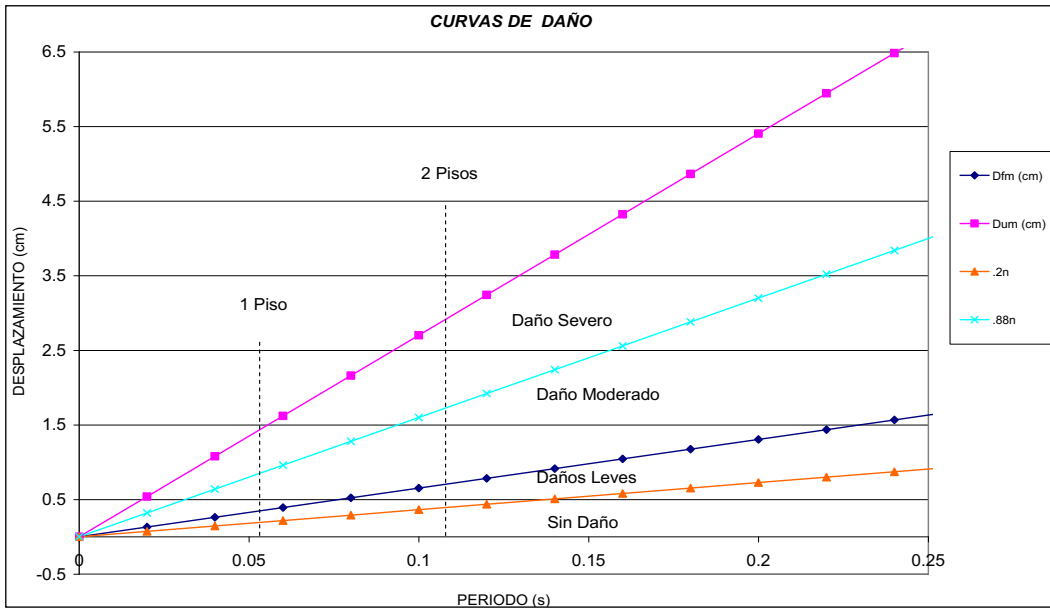
Curvas de derivas para estructuras en mampostería de un piso.



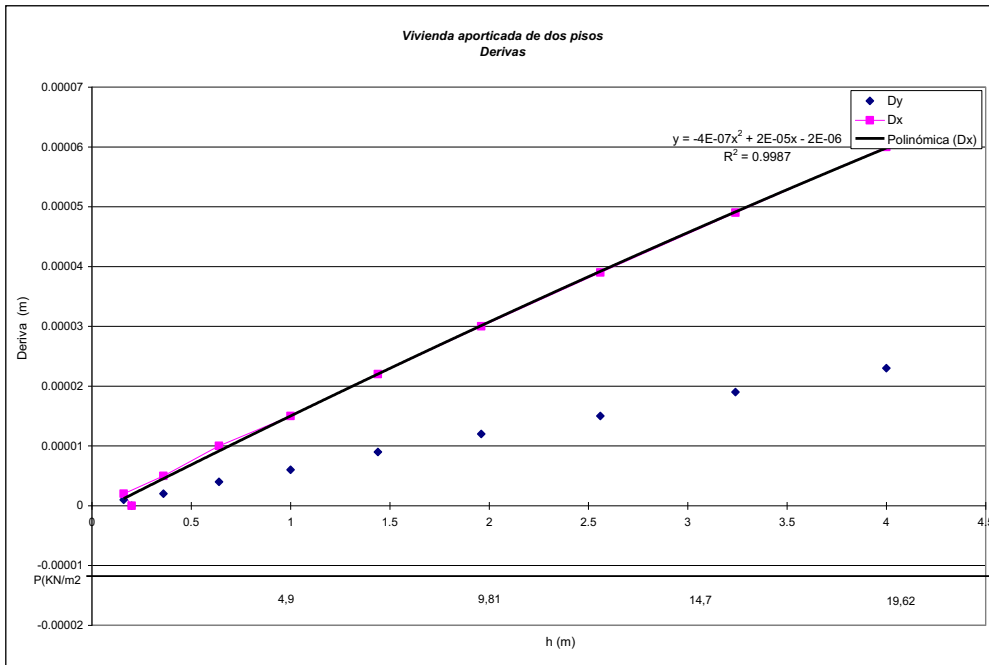
Curvas de derivas para estructuras en mampostería de dos pisos.



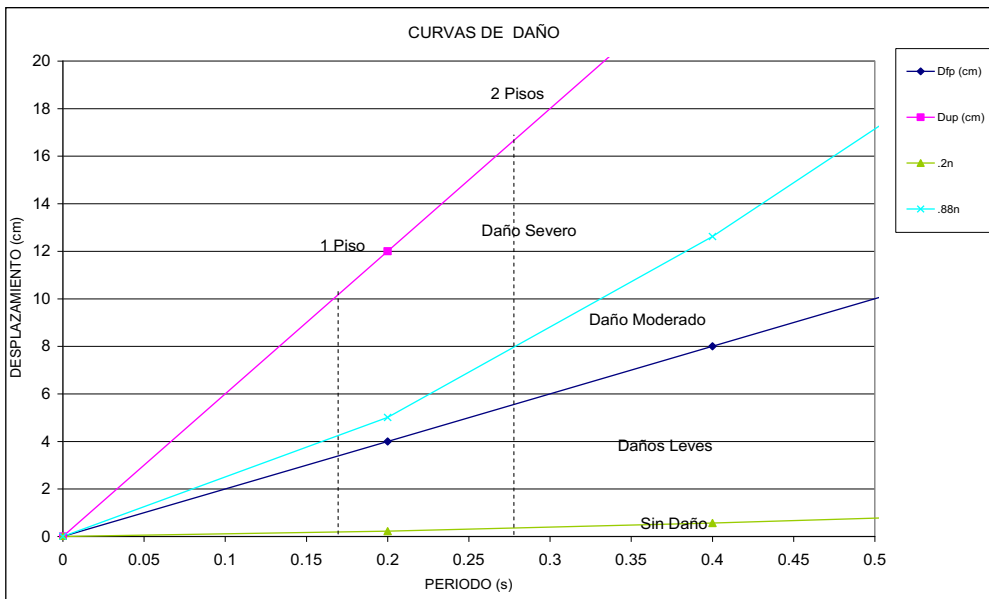
Curvas de daño para estructuras en mampostería.



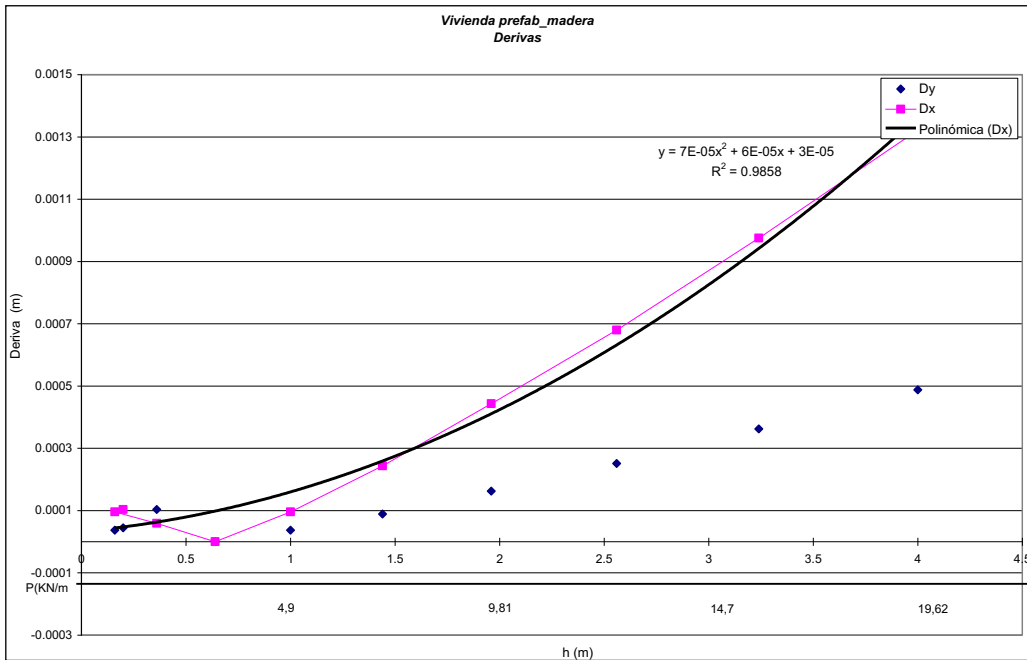
Curvas de derivas para estructuras aporricadas de 2 pisos.



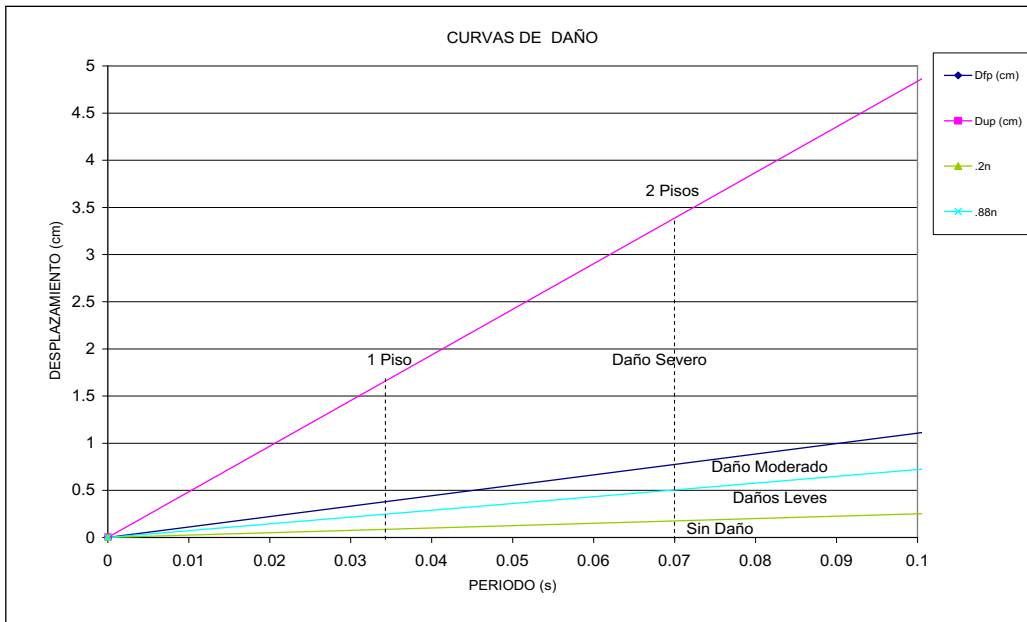
Curvas de daño para estructuras aporricadas.



Curvas de derivas para estructuras en prefabricado y madera.



Curvas de daño para estructuras en prefabricado y madera.



B.5 CURVA DE FRAGILIDAD DESARROLLADA POR PRIETO ET AL. (2018)

