

REPORTE FINAL FASE I: EVALUACIÓN DE RIESGO SÍSMICO



miyamoto. EARTHQUAKE + STRUCTURAL ENGINEERS



PROGRAMA PREPARE - USAID/OFDA

PREPARACIÓN DE PERSONAL DE RESCATE Y EMERGENCIA PARA MEJORAR LA RESPUESTA A SISMOS



Pasto, Colombia
Febrero de 2017

REPORTE FINAL FASE I: EVALUACIÓN DE RIESGO SÍSMICO



PROGRAMA PREPARE - USAID/OFDA

PREPARACIÓN DE PERSONAL DE RESCATE Y EMERGENCIA PARA MEJORAR LA RESPUESTA A SISMOS



RESUMEN EJECUTIVO

Una evaluación probabilística del riesgo sísmico para San Juan de Pasto (de aquí en adelante Pasto) en Colombia fue llevado a cabo como parte de la fase I del Programa Preparación de Personal de Rescate y Emergencia para Mejorar la Respuesta ante Sismos (PREPARE). Los objetivos del proyecto fueron evaluar los valores esperados de daño en edificaciones, muertes (en escenarios tanto diurnos como nocturnos), y el volumen de escombros que resultarían de un sismo potencial. Los resultados pueden ser luego utilizados para preparar políticas o planes de acción que reduzcan el impacto humano y socioeconómico que sería causado por sismos futuros en Pasto.

Los datos de investigación actuales y los mapas disponibles fueron la base para desarrollar el nivel proyectado (periodo de retorno de 475 años) de amenaza sísmica y las condiciones de sitio que fueron usadas como aporte sísmico probabilístico para el análisis de riesgo. Imágenes satelitales fueron examinadas como parte del programa de evaluación de riesgo y con el fin de recolectar información se llevaron a cabo inspecciones de campo en una muestra representativa de edificaciones.

Los datos de exposición para el área de estudio se encuentran en la Tabla 1. La información recolectada fue usada para dividir las edificaciones en varios grupos de construcción similar. Esta aproximación fue la base para el modelo exposición. Para cada tipología de edificación se desarrollaron funciones de fragilidad. Las funciones de consecuencia (daño estructural, muertes y escombros) resultantes que corresponden a cada estado de daño (DS) para un determinado tipo de edificación, corresponden a entradas para el cálculo.

Los archivos de entrada fueron usados para correr simulaciones Monte Carlo con la plataforma de cálculo de riesgo OpenQuake. El análisis de riesgo sísmico se llevó a cabo para todo tipo de edificaciones del modelo de exposición y los resultados del riesgo de cada propiedad edificada fueron acumulados con respecto a las zonas individuales (Primarias y Especiales) y para Pasto como un todo. La distribución de zonas individuales por un patrón de uso de terreno es benéfico para el gobierno y los funcionarios de la ciudad ya que es una información valiosa para la preparación y mitigación de riesgo.

Tabla 1. Datos de Exposición

No. de edificaciones	Área construida, km ²	Número de ocupantes (diurno)	Número de ocupantes (nocturno)
97,200	10.8	457,000	376,000

La Tabla 2, resume el riesgo sísmico estimado para Pasto. El análisis reveló que:

- El número de edificaciones que se espera sean calificadas en Amarillo (daño moderado) o calificadas en Rojo (severamente afectadas o colapsadas) se estiman alrededor de 58,500 o aproximadamente el 60% del compendio de edificaciones.
- Dependiendo de la hora del evento, se prevén aproximadamente entre 4,000 a 5,000 muertes subsecuentes (para una tasa estimada del 1%) y un aproximado de entre 33,000 a 43,000 heridos (a una tasa del 9%).
- Se calculó un volumen significativo de escombros generados de 2,330,000 m³

Tabla 2. Valores esperados de riesgo sísmico en Pasto

Daño estructural km ² (%)	Muertes		Heridos		Calificación Inseguridad		Volumen de escombros. (10 ⁶) m ³
	Diurno, persona (%)	Nocturno, persona (%)	Diurno, persona (%)	Nocturno, persona (%)	Amarillo, no. (%)	Rojo, no. (%)	
4.59	5,200	3,900	43,000	33,000	30,500	28,000	2.33
(42%)	(1.1%)	(1.0%)	(9.5%)	(8.7%)	(31%)	(29%)	

La distribución espacial de las edificaciones etiquetadas en Rojo se presenta en la Figura 1. Como lo muestra la figura, en unas pocas zonas se encuentra una gran concentración de edificaciones en rojo.

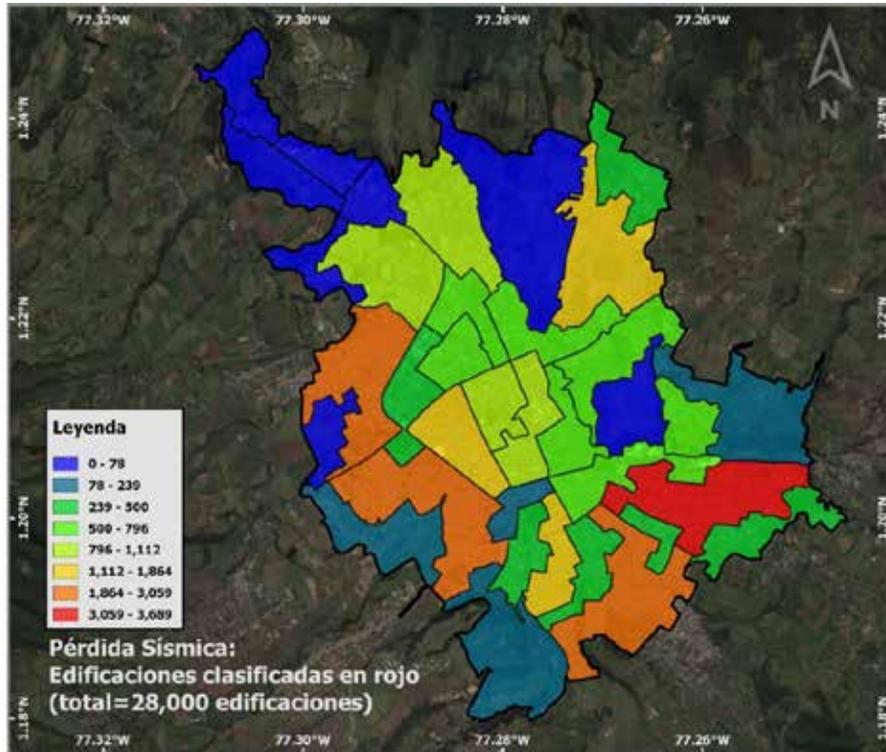


Figura 1. Distribución espacial de Edificaciones etiquetadas en Rojo

Las altas tasas de daño físico, muertes y heridos causados por un sismo y calculados en este estudio, se deben a la gran cantidad de edificaciones vulnerables tales como Mampostería No reforzada y construcciones no dúctiles antiguas. Los resultados resaltan la necesidad de desarrollar programas para la mitigación del riesgo. Como parte de dicho programa, se recomienda implementar las siguientes estrategias:

- Proveer un programa de fortalecimiento sísmico para estructuras importantes que evidencien mayor riesgo a razón de su vulnerabilidad estructural inherente, densidad de ocupantes e importancia.
- Establecer un programa de evaluación de daño Post-sismo. Es crucial entrenar y certificar ingenieros y establecer planes logísticos. Dicho programa mejorará la respuesta y los esfuerzos de recuperación después de grandes sismos.
- Establecer programas comunicación y de alcance público. Es fundamental comunicar los resultados y las recomendaciones mencionadas anteriormente. La comunidad debería estar informada del riesgo sísmico y los métodos de reducción de riesgo.
- Optimizar la distribución de respuesta ante emergencias y recursos de recuperación a través de la identificación de las regiones más vulnerables.

Los resultados, hallazgos y conclusiones que se presentan en es este reporte, se basan en un análisis de riesgo sísmico derivado de referencias internacionalmente reconocidas y de las más recientes técnicas analíticas. Sin embargo, como en cualquier proyecto de ingeniería, los métodos y análisis esenciales se basan en ciertos criterios técnicos y suposiciones. Adicionalmente, los resultados se basan en un escenario de intensidad sísmica para un nivel de diseño dado y corresponden a los valores esperados o media. Esto es, que los resultados presentan los efectos esperados para un evento promedio de una muestra de un gran grupo de eventos con intensidades similares. Esto implica que, los resultados en este reporte incluyen un cierto nivel de incertidumbre (inherente en la evaluación de riesgo) y no deberían ser extrapolados directamente a un evento sísmico futuro (e.g. evaluación determinística). De la misma manera, estos preconceptos y variaciones deberían ser considerados cuando se interpreten los hallazgos y se aplique los resultados a un plan futuro.

Contenido

Resumen Ejecutivo	3
1. Introducción.....	14
1.1 Antecedentes del Proyecto.....	14
1.2 Fase I descripción.....	15
2. Amenaza Sísmica en Pasto.....	17
2.1 Generalidades	17
2.2 Aceleración en roca	17
2.3 Clasificación de sitio.....	17
2.4 Parámetros sísmicos de diseño.....	19
3. Modelo de Exposición.....	21
3.1 Generalidades	21
3.2 Límites de la zona evaluada	21
3.3 Tipología de las edificaciones	23
3.4 Edificaciones en Pasto.....	25
3.4.1 Generalidades	25
3.4.2 Distribución de las Edificaciones de Pasto	28
3.5 Edificaciones inspeccionadas.....	32
3.5.1 Generalidades	32
3.5.2 Distribución espacial de las edificaciones inspeccionadas.....	32
3.5.3 Distribución zonal de las edificaciones inspeccionadas	33
3.5.4 Distribución del uso de tierra de las edificaciones inspeccionadas	36
3.6 Tipología de las Edificaciones y distribución de la ocupación del Modelo de exposición	37
3.6.1 Distribución de acuerdo al tipo de construcción	38
3.6.2 Distribución de acuerdo al tipo de ocupación	39
3.6.3 Distribución de acuerdo a la altura de la edificación	40
4. Funciones de Fragilidad y Daño	43
4.1 Funciones de fragilidad de la edificación.....	43
4.1.1 Valores por defecto del modelo Hazus (Software) de FEMA (Agencia Federal de Manejo de Emergencias)	43

4.1.2	Modificaciones de la función de Fragilidad.....	44
4.1.3	Parámetros de Fragilidad para las edificaciones de Pasto	46
4.2	Funciones de Resultado	49
4.2.1	Daño estructural	49
4.2.2	Muertes (FEMA Hazus gravedad 4 y gravedad 3)	51
4.2.3	Heridos (FEMA Hazus gravedad 2 y gravedad 1).....	54
4.2.4	Volumen de escombros	55
5.	Metodología del análisis de riesgo	56
5.1	Generalidades	56
5.2	Algoritmo de Análisis de riesgo.....	56
5.3	Simulaciones Monte Carlo (MCS)	57
5.3.1	Generalidades	57
5.3.2	Metodología.....	57
6.	Resultados de la Evaluación de Riesgo	60
6.1	Generalidades	60
6.2	Resultados.....	60
6.2.1	Generalidades	60
6.2.2	Pérdidas humanas previstas (muertes y heridos)	60
6.2.3	Daño previsto en Edificaciones (por categorías de calificación de color)	60
6.2.4	Daño previsto en Edificaciones (cociente de daño y volumen de escombros).....	61
6.3	Mapas de distribución de Riesgo	64
6.4	Resultados Acumulados.....	69
6.4.1	Generalidades	69
6.4.2	Daño físico y calificación de edificaciones	69
6.4.3	Muertes y heridos	69
6.4.4	Discusión	69
7.	Conclusiones.....	70
8.	Referencias	73
	Apéndices	74

Lista de Tablas

Tabla 1. Datos de Exposición	3
Tabla 2. Valores esperados de riesgo sísmico en Pasto	4
Tabla 3. Relación entre velocidad de corte y clasificación de sitio (NSR-10 2010)	18
Tabla 4. Factores de amplificación de sitio de PGA para Pasto	20
Tabla 5. Estadísticas básicas para Pasto.....	21
Tabla 6. Tipología de edificaciones que fueron usadas en el análisis	23
Tabla 7. Características primarias de la tipología de edificaciones que fueron usadas en el análisis.....	23
Tabla 8. Patrones de use de tierra para zonas primarias.....	25
Tabla 9. Patrones de uso de tierra para zonas especiales	25
Tabla 10. Distribución de edificaciones y uso de tierra para zonas primarias	28
Tabla 11. Distribución de edificaciones y uso de tierra para zonas especiales.....	30
Tabla 12. Número total y área base de las edificaciones en todas las zonas.....	32
Tabla 13. Área total de las edificaciones y número promedio de pisos	32
Tabla 14. Distribución de edificaciones inspeccionadas, zonas primarias.....	34
Tabla 15. Distribución de edificaciones inspeccionadas, zonas especiales.....	35
Tabla 16. Composición del modelo de exposición basado en el tipo de edificación	38
Tabla 17. Composición del modelo de exposición basado en el tipo de ocupación de la edificación	39
Tabla 18. Composición del modelo de exposición basado en la altura de la edificación	40
Tabla 19. Componentes esenciales del modelo de exposición de Pasto	40
Tabla 20. Clasificación de fragilidad de las edificaciones.....	43
Tabla 21. Parámetros por defecto de la función de fragilidad del modelo Hazus de FEMA.....	44
Tabla 22. Valores por defecto Hazus y características del movimiento de suelos en Pasto.....	45
Tabla 23. Factores de ajuste para desviación estándar	46
Tabla 24. Parámetros de la función de fragilidad modificados para Pasto.....	46
Tabla 25. Cociente de daño estructural por defecto Hazus.....	49
Tabla 26. Cociente de daño para sismos anteriores en Colombia y Sur América	51
Tabla 27. Cocientes de daño estructural modificados usados para Pasto	51

Tabla 28. Tasas de mortalidad por defecto del modelo Hazus de FEMA.....	52
Tabla 29. Cociente de mortalidad de sismos anteriores en Colombia y Sur América.....	53
Tabla 30. Tasas de mortalidad modificadas usadas para Pasto	53
Tabla 31. Tasas de heridos por defecto del modelo Hazus de FEMA	54
Tabla 32. Tasas de heridos modificadas usadas para Pasto.....	54
Tabla 33. Volumen de escombros para Pasto	55
Tabla 34. Datos de exposición para Pasto	69
Tabla 35. Valores previstos de pérdida estructural	69
Tabla 36. Valores previstos de muertes y heridos	69
Tabla 37. Área edificada y exposición de la población para Pasto	71
Tabla 38. Valores previstos de exposición ante riesgo sísmico para Pasto	71

Lista de Figuras

Figura 1. Distribución espacial de edificaciones clasificados en rojo.....	5
Figura 2. Mapa de San Juan de Pasto.....	14
Figura 3. Distribución de PGA para diseño sísmico especificado en el código para Colombia (NSR-10 2010)	16
Figura 4. Vs30 Estimados (SGC 2015).....	17
Figura 5. Clasificación de sitio estimados (SGC 2015).....	18
Figura 6. Factor de amplificación de sitio para PGA	18
Figura 7. Diseño de PGA sísmico con amplificación de suelos, Pasto	19
Figura 8. Límites de la ciudad de Pasto y el área de estudio	21
Figura 9. Límites de San Juan de Pasto	21
Figura 10. Ejemplos de las tipologías de edificaciones en Pasto, Colombia	23
Figura 11. Zonificación de la ciudad para el modelo de exposición.....	25
Figura 12. Distribución espacial de las zonas primarias por uso de tierras	25
Figura 13. Distribución espacial de las zonas especiales por uso de tierras	26
Figura 14. Sistema de numeración que se usó en zonas primarias	26
Figura 15. Sistema de numeración que se usó en zonas especiales	26
Figura 16. Distribución espacial de las 2,084 edificaciones inspeccionadas.....	31
Figura 17. Porcentaje de edificaciones inspeccionadas, zonas primarias.....	36
Figura 18. Porcentaje de edificaciones inspeccionadas, zonas especiales	36
Figura 19. Composición de las edificaciones basado en tipología de edificación (normalizado)	37
Figura 20. Composición de las edificaciones basado en el patrón de ocupación (normalizado).....	38
Figura 21. Composición de las edificaciones basado en número de pisos (normalizado).....	39
Figura 22. Distribución espacial del número de edificaciones.....	40
Figura 23. Distribución espacial del área total edificada	40
Figura 24. Distribución espacial del número de ocupantes durante el día.....	41
Figura 25. Distribución espacial del número de ocupantes durante la noche.....	39
Figura 26. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 1 (adobe).....	46

Figura 27. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 2 (Mampostería no reforzada Muro portante).....	47
Figura 28. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 3 (Mampostería no reforzada y pórtico de confinamiento de concreto Reforzado)	47
Figura 29. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 4 (Pórtico de Mampostería Reforzada y relleno de mampostería no reforzada, baja altura).....	48
Figura 30. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 5 (Pórtico de Mampostería Reforzada y relleno de mampostería no reforzada, altura media)	48
Figura 31. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 6 (Pórtico de Mampostería Reforzada o Muro de Concreto reforzado, altura media)	48
Figura 32. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 7 (Pórtico de Mampostería Reforzada o Muro de Concreto reforzado, altura elevada).....	49
Figura 33. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 8 (edificaciones de acero de bajo calibre).....	49
Figura 34. Tasas de pérdidas económicas previstas para los Estados Unidos y Colombia (USGS et al. 2011).....	50
Figura 35. Tasas de muertes previstas para los Estados Unidos y Colombia, dada por la USGS (USGS et al. 2009) ..	48
Figura 36. Diagrama de flujo para análisis	56
Figura 37. Flujo del proceso usando la máquina de cálculo de riesgo OpenQuake.....	57
Figura 38. Investigación del número suficiente de MCSs para este proyecto	58
Figura 39. Distribución de resultados de MCS para una edificación muestra	58
Figura 40. Diagrama de flujo de la estimación de daño sísmico para este proyecto	59
Figura 41. Cociente de heridos distribución de mortalidad por zonas primarias	58
Figura 42. Distribución ordenada de muertes en zonas primarias	62
Figura 43. Distribución de categorías de daño a edificaciones para zonas primarias.....	62
Figura 44. Distribución ordenada de edificaciones calificadas en rojo y en rojo+amarillo para zonas primarias	59
Figura 45. Distribución de cocientes de daño en edificaciones para zonas primarias.....	60
Figura 46. Distribución ordenada de volumen de escombros (m3) para zonas primarias	60
Figura 47. Distribución espacial del daño estructural.....	65
Figura 48. Distribución espacial de edificaciones etiquetadas en rojo	66
Figura 49. Distribución espacial de muertes.....	67

Figura 50. Distribución espacial de heridos 68

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del Proyecto

El programa PREPARE pretende desarrollar un nuevo proyecto de Reducción de Riesgo de Desastre (DRR) y Gestión de Riesgo de Desastre (DRM) en el cantón de San José, Costa Rica y en Pasto, Colombia. El proyecto plurianual, con apoyo financiero de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional/Oficina de los Estados Unidos de América para la Asistencia de Desastre en el Extranjero (USAID/OFDA), cuenta con la cooperación y el apoyo de organizaciones colaboradoras locales Costarricenses y Colombianas. Los beneficiarios objetivo son los ciudadanos de las dos regiones que viven en zonas que se encuentran en alto riesgo de futuros sismos.

El programa PREPARE se enfoca en proveer a instituciones nacionales y municipales de Reducción de Riesgo de Desastre, una imagen más clara del probable impacto de un sismo. El programa también quiere ayudar a dichas instituciones a cumplir sus metas de reducción de víctimas, así como el impacto socioeconómico de futuros sismos.

Los dos objetivos generales del programa PREPARE son:

- Fortalecer la planeación y preparación de respuesta a sismos de las instituciones nacionales y municipales de Reducción de Riesgo de Desastre en San José (Costa Rica) y Pasto (Colombia). Este objetivo se ajusta al subsector de Amenaza Geológica de OFDA.
- Fortalecer las políticas de gestión del riesgo y las prácticas de las instituciones de Reducción de Riesgo de Desastre nacionales y municipales para la reducción de muertes, heridos, costos financieros y alteraciones económicas. Este objetivo coincide con el subsector de Políticas y Planeación y el subsector de Capacidad de construcción y capacitación.

Los tres componentes principales del programa PREPARE serán implementados durante tres fases:

- **Fase I: Evaluación del riesgo sísmico.** Evaluar las amenazas sísmicas y el riesgo sísmico para determinar el daño probabilístico a estructuras edificadas y las muertes probables entre los residentes de cada ciudad objetivo.
- **Fase II: Análisis de Escenarios sísmicos y planeación de la respuesta.** Analizar los escenarios sísmicos basándose en los resultados de la evaluación del riesgo; revisar planes, políticas y prácticas para la respuesta, incluyendo evaluación rápida de daños y manejo de escombros.
- **Fase III: Capacitación técnica.** Implementar actividades de capacitación en Reducción de Riesgo de Desastre basados en una revisión de los resultados de planes previos. La meta es que después de completar el programa PREPARE las organizaciones colaboradoras habrán ganado el conocimiento para llevar a cabo evaluaciones de riesgo sísmico y analizar escenarios de sismo, así como también continuarán mejorando su capacidad de Reducción de Riesgo Sísmico y Gestión de Riesgo de desastre en el futuro.

Este reporte se enfoca en la Fase I del Proyecto para Pasto, Colombia.

1.2 Fase I descripción

La ciudad de Pasto, Colombia, está en una zona de alta sismicidad y se encuentra en alto riesgo por sismos fuertes en el futuro. Las nuevas edificaciones en Pasto han sido construidas usando códigos sísmicos modernos, están bien construidos y cumplen con altos estándares sísmicos (y por esto se anticipa que se comportarán satisfactoriamente antes sismos). La ciudad también contiene numerosas estructuras antiguas que son vulnerables a daño sísmico. Muchas estructuras antiguas no están bien construidas, especialmente en los barrios más pobres.

Colombia es una región sísmicamente activa que ha experimentado grandes sismos. El sismo de Quetame en 2008 Mw 5.7, resultó en 11 muertes, decenas de heridos y en el colapso de muchas edificaciones. El sismo de Ospina (Nariño) en 2013 sentido en Pasto, resultó en el daño de algunas edificaciones, y el terremoto de Armenia en 1999 Mw 6.2 resultó en miles de muertes y heridos y causó el colapso de muchas estructuras en la zona.

La figura 2 muestra el mapa de Pasto. El objetivo de este estudio es la zona urbana de de San Juan de Pasto.

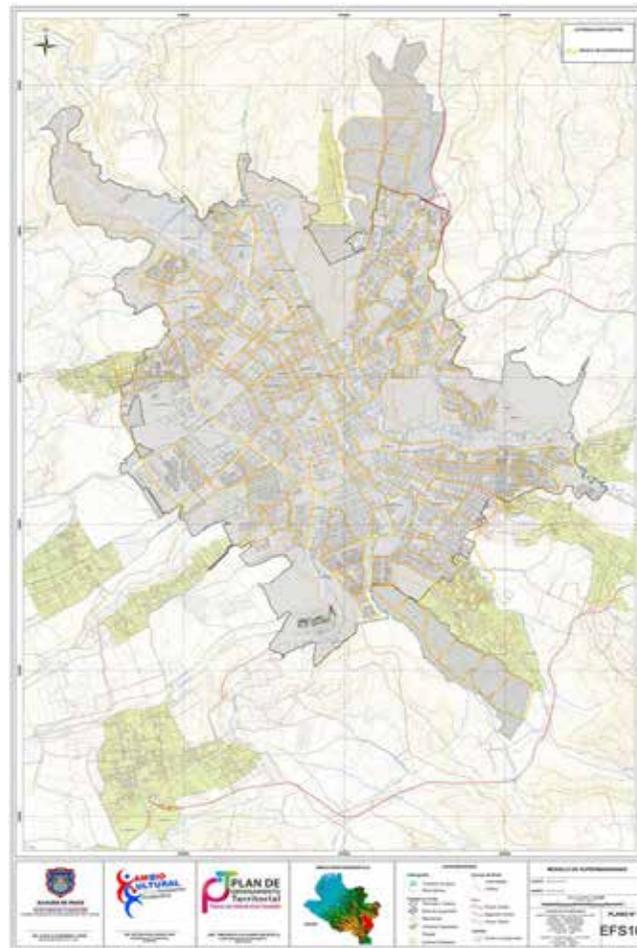


Figura 2. Mapa de San Juan de Pasto

Los cálculos fueron realizados en OpenQuake, un paquete de software de acceso libre que permite el uso de datos y aplicaciones desarrolladas o que están en proceso de desarrollo. El paquete comprende la Plataforma, la Máquina de cálculo, y una variedad de herramientas para modelar, acceder a productos del GEM (Modelo Global de Sismos) y para compartir información y resultados. GEM provee una serie de herramientas y modelos de análisis de amenaza y riesgo, incluyendo la herramienta IDCT (Herramientas de captura de información).

Este compendio de software permite a los usuarios recolectar y modificar la información de exposición de la edificación, la cual puede ser adicionada a la Base de datos Global de Exposición (GED). Los datos en GED son más relevantes para los tipos de edificación y métodos de construcción usados en países en desarrollo como Colombia. Las herramientas de recolección de datos IDCT dependen de dos fuentes: Análisis satelital con sensores remotos y observación directa en el campo usando herramientas de recolección móviles. Esta información fue entonces empleada para especificar las funciones de fragilidad que serán usadas para diferentes tipos de edificaciones y estados de daño (DS).

2. AMENAZA SÍSMICA EN PASTO

2.1 Generalidades

La amenaza sísmica se basó en una intensidad sísmica (aceleración pico del suelo, o PGA) para el nivel de diseño sísmico (475 años). La respuesta del sitio fue preparada usando la información de aceleración en roca y la investigación de suelo (clasificación de sitio) para Pasto.

2.2 Aceleración en roca

La Figura 3 muestra la distribución PGA de Colombia según lo provee el Código de Construcción Sismo Resistente Colombiano NSR-10 (2010). Como el mapa lo indica, la aceleración en roca para Pasto es igual a 0.25 g.

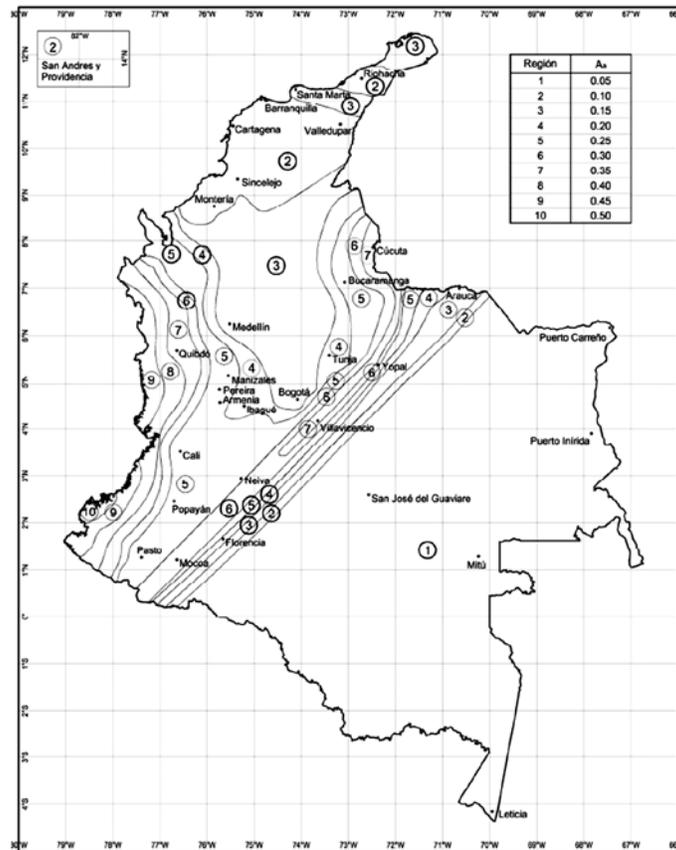


Figura A.2.3-2 — Mapa de valores de A_s

Figura 3. Distribución de PGA para diseño sísmico especificado en el código para Colombia (NSR-10 2010)

2.3 Clasificación del sitio

Estudios de investigación de comportamiento dinámico de suelos para Pasto fueron llevados a cabo por Eraso (SGC 2015). La velocidad de corte a 30m estimada (V_{s30}) para Pasto se muestra en la Figura 4. El código Colombiano de construcción (NSR-10) relaciona las velocidades V_{s30} medidas con una clasificación del sitio, ver Tabla 3. Basados en las velocidades de corte, la clasificación del sitio para Pasto fue entonces determinada (SGC 2015) como lo muestra la Figura 5.

Nótese que una gran parte del área de estudio coincide con las clasificaciones de sitio C o D. La clasificación del sitio E se encuentra presente en una pequeña zona. Sin embargo, para esas áreas no hay potencial de licuación. No se ha observado daño por licuación en sismos anteriores en Pasto y la información es insuficiente para determinar el potencial de licuación que podría ocurrir en esas áreas. Por lo tanto, el daño por licuación no fue considerado de aquí en adelante.

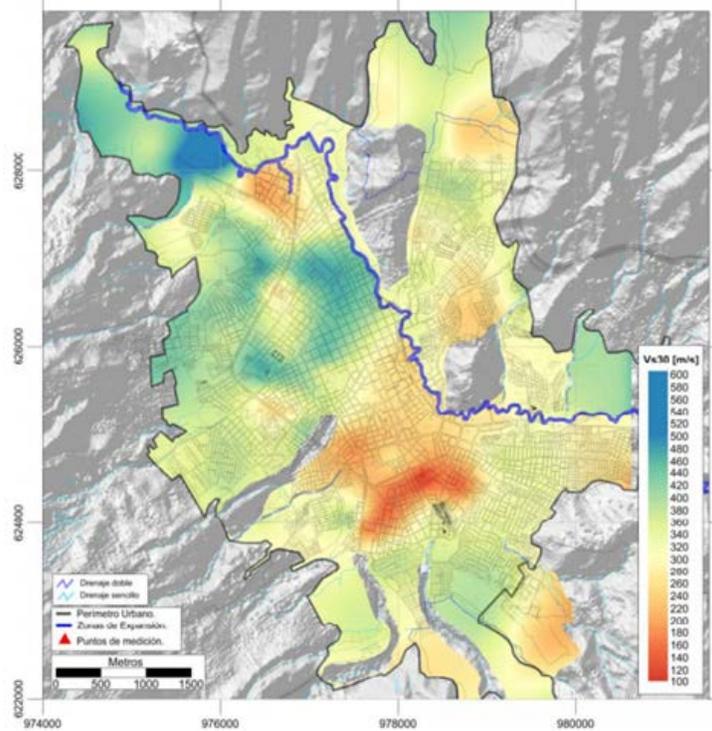


Figura 4. Mapa de Vs30 (SGC 2015)

Tabla 3. Relación entre velocidad de corte y clasificación de sitio (NSR-10 2010)

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_{11} \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_{11} \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{v}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_{11}
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F ₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F ₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F ₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F ₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 35 m)	

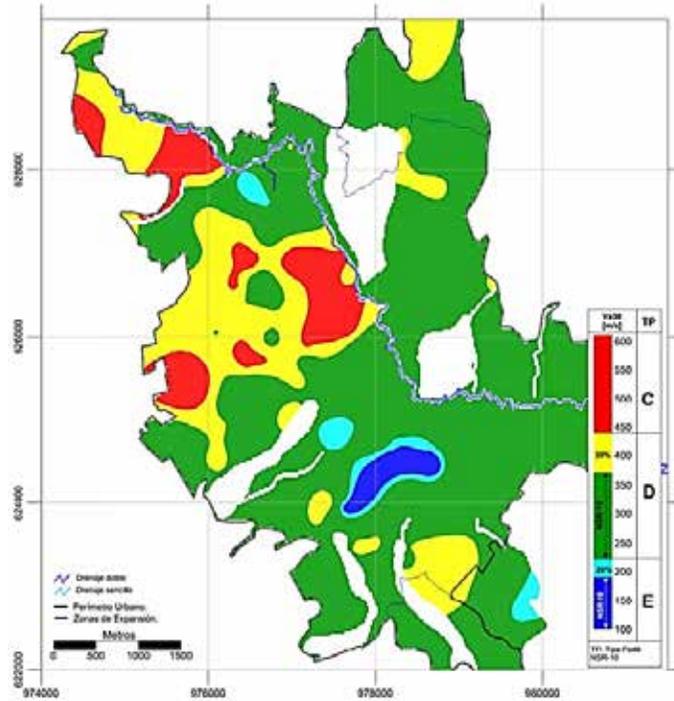


Figura 5. Clasificación de sitio (SGC 2015)

2.4 Parámetros sísmicos de diseño

El periodo corto y el factor de amplificación de sitio (F_A) se encuentra en el Código Colombiano de construcción (NSR-10 2010) y está reproducido en la Figura 6. Como lo muestra la figura, el factor de amplificación de sitio depende de la clasificación de sitio y del PGA.

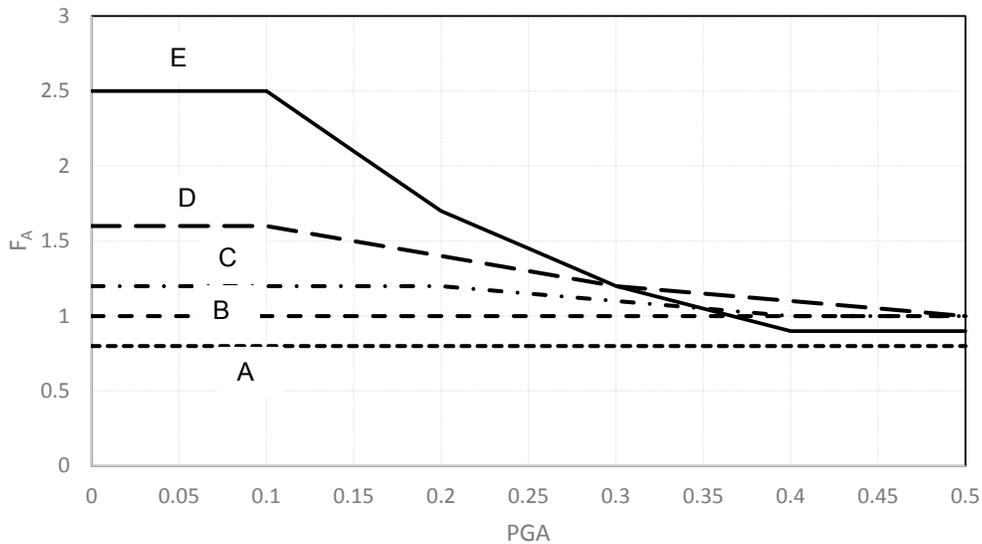


Figura 6. Factor de amplificación de sitio para PGA

Para Pasto, el PGA es igual a 0.25g. Los factores de amplificación fueron calculados basados en éste valor PGA y se encuentran listados en la Tabla 4. Como resultado, el PGA específico de sitio para diseño sísmico para Pasto oscilaría entre 0.29g a 0.36g (Figura 6). La Figura 7, presenta un mapa de valores del PGA específico de sitio para diseño sísmico para Pasto (incluyendo el factor de amplificación de sitio)

Tabla 4. Factores de amplificación de sitio de PGA para Pasto

Clasificación de sitio	F_A
B	1.00
C	1.15
D	1.30
E	1.45

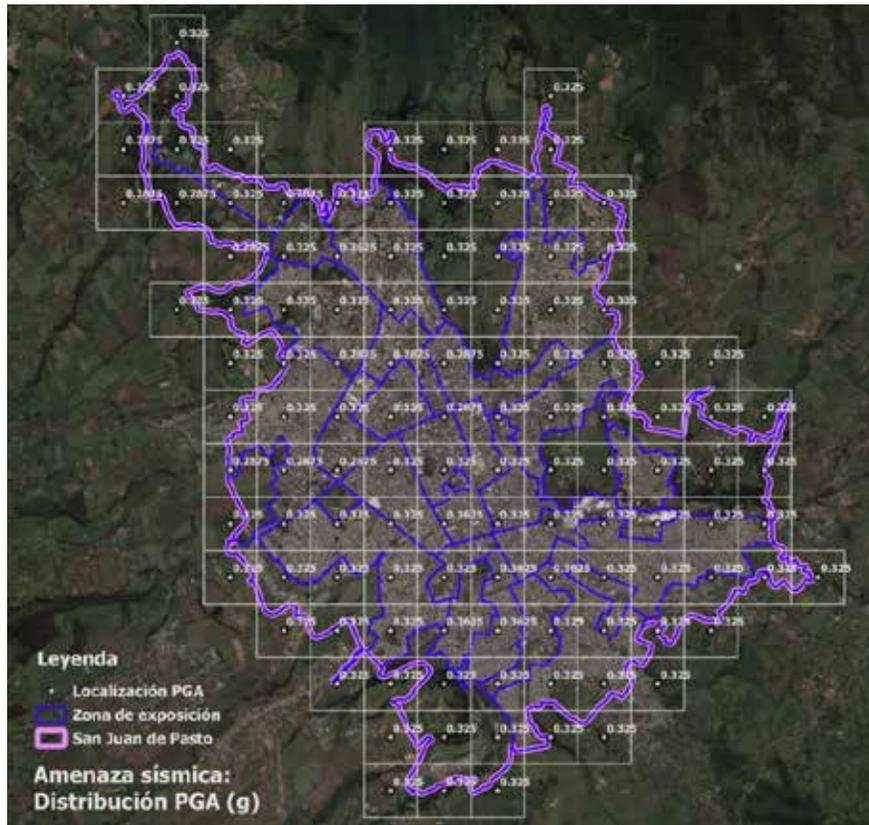


Figura 7. PGA para diseño sísmico con amplificación sísmica para Pasto

3. MODELO DE EXPOSICIÓN

3.1 Generalidades

El modelo de exposición para Pasto fue desarrollado a través de una metodología estadística usando información de censos, una inspección de campo de edificaciones existentes y el criterio de zona. La ciudad fue dividida en varias zonas de acuerdo al patrón de uso de suelos para reflejar las características regionales.

Basado en la información del censo, tanto las edificaciones como la población, fueron ubicadas adecuadamente en cada zona considerando las tipologías de las edificaciones que fueron identificadas en la inspección de campo.

3.2 Límites de la zona evaluada

La Figura 8, muestra los límites del municipio de Pasto, incluyendo áreas urbanas y rurales. Para éste análisis se usó la sección urbana de este municipio que contiene la mayoría de las áreas edificadas; ver Figura 9.

Los datos básicos para el área objetivo se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Estadísticas básicas para Pasto

Edificaciones		Ocupantes	
No.	Area, m ²	Día	Noche
97,200	10,800,000	457,000	376,000



Figura 8. Límites de la ciudad de Pasto y el área de estudio (Alcaldía de Pasto)



Figura 9. Límites de la zona urbana de San Juan de Pasto

3.3 Tipología de las edificaciones

Las edificaciones en Pasto fueron categorizadas en seis tipos de construcción basados en los sistemas de Resistencia a fuerza lateral (LFRS) y los materiales de construcción. Dos de los tipos de construcción fueron luego subdivididos en dos grupos basados en la altura de las edificaciones. Los ocho tipos de edificaciones resultantes se encuentran listados en la Tabla 6. La información de fragilidad para esos tipos de edificaciones fue entonces desarrolladas y usada en el análisis.

Tabla 6. Tipología de edificaciones usadas en el análisis

Tipología	Sistema de Resistencia a fuerza lateral (LFRS) y materiales	Altura
1	Adobe (sin diseño técnico)	Baja
2	Mampostería no reforzada (URM) muro portante	Baja
3	Mampostería no reforzada (URM) con muro portante en concreto reforzado (RC), vigas de confinamiento y columnas adheridas (Mampostería confinada)	Baja
4	Pórtico de RC resistente a momento con relleno URM	Baja
5	Pórtico de RC resistente a momento con relleno URM	Media
6	Pórtico de RC resistente a momento o Muro de cortante de RC	Media
7	Pórtico de RC resistente a momento o Muro de cortante de RC	Alta
8	Acero de bajo calibre	Baja

Las características principales de las edificaciones se encuentran descritas en la tabla 7. La Figura 10 muestra ejemplos de algunos tipos de construcción en Pasto.

Tabla 7. Características primarias de la tipología de edificaciones usadas en el análisis

1	Madera/Metal	<1984 or <1998	Residencial (unifamiliar), histórica	Algunas
2	Madera/Metal	<1984 or <1998	Residencial (unifamiliar) Comercial (local pequeño) Industrial (fábrica pequeña)	Muchas
3	Madera/Metal	<1984 or <1998	Residencial (unifamiliar) Comercial (local pequeño)	Muchas
4	Concreto	<1984, <1998, or <2010	Residencial (multifamiliar)	Algunas
5			Comercial (local grande), oficinas	Algunas
6	Concreto	<2010 or 2010<	Hospital, oficinas	Algunas
7			Apartamentos	Algunas
8	Metal	<1984, <1998, o <2010	Comercial (centro comercial) Industrial (fábrica)	Pocas



Tipo 1



Tipo 2



Tipo 3



Tipo 4



Tipo 5



Tipo 6

Figura 10. Ejemplos de las tipologías de edificaciones en Pasto, Colombia

3.4 Edificaciones en Pasto

3.4.1 Generalidades

La distribución y construcción de edificaciones en Pasto, ha conducido a una división natural entre las llamadas zonas primarias y zonas especiales. Entre las zonas primarias, las más grandes, designan una distribución típica de edificación y uso de tierras, mientras la zonas especiales determinan un número pequeño de patrones de uso de seulos usualmente con alta densidad para una pequeña área. Usando imágenes satelitales y datos de la ciudad, se identificaron seis patrones primarios y cuatro patrones especiales de uso de tierra para Pasto; ver Tabla 8 y Tabla 9, respectivamente. La Figura 11 muestra el área de estudio dividida en estas zonas. La Figura 12 y la Figura 13 indican la distribución espacial para zonas primarias y especiales, respectivamente, para varios patrones de uso de tierra.

Tabla 8. Patrones de use de tierra para zonas primarias

Número	Patrón de uso de tierra	Descripción
1	Industria	Edificaciones para uso comercial e industrial de altura baja
2	Área urbana	Edificaciones para uso residencial y comercial/oficinas de altura baja y altura media
3	Comercial	Edificaciones para uso comercial, residencial y educativo (incluyendo colegios) de altura baja y altura media
4	Residencial	Edificaciones para uso residencial y comercial de altura baja y altura media
5	Residencial escaso	Edificaciones residenciales de altura baja y baja densidad
6	Espacio abierto (otro)	Básicamente espacios abiertos tales como parques y campos con pocas edificaciones de altura baja

Tabla 9. Patrones de uso de tierra para zonas especiales

Número	Patrón de uso de tierra	Descripción
1	Complejo de altura elevada	Complejos de Apartamentos/Condominios de altura media y altura elevada
2	Hospital grande	Instalaciones médicas grandes de altura baja y altura media (cuadra-ciudad)
3	Iglesia grande	Instalaciones religiosas grandes de altura baja (cuadra-ciudad)
4	Centro comercial grande	Instalaciones comerciales grandes (centros comerciales, tiendas de mercado) de altura baja (cuadra-ciudad)

En total se identificaron 36 zonas primarias y 49 zonas especiales. La Figura 14 y la Figura 15 representan el sistema de numeración que fue usado para las zonas primarias y especiales, respectivamente. Los límites zonales y el sistema de numeración no necesariamente se correlacionan con alguna subdivisión política o municipal en Pasto. En lugar de esto, fueron seleccionados para generar uniformidad en el uso de tierra y para tener alta precisión haciendo que las muestras de edificaciones inspeccionadas representen el conjunto de edificaciones de la ciudad como un todo.

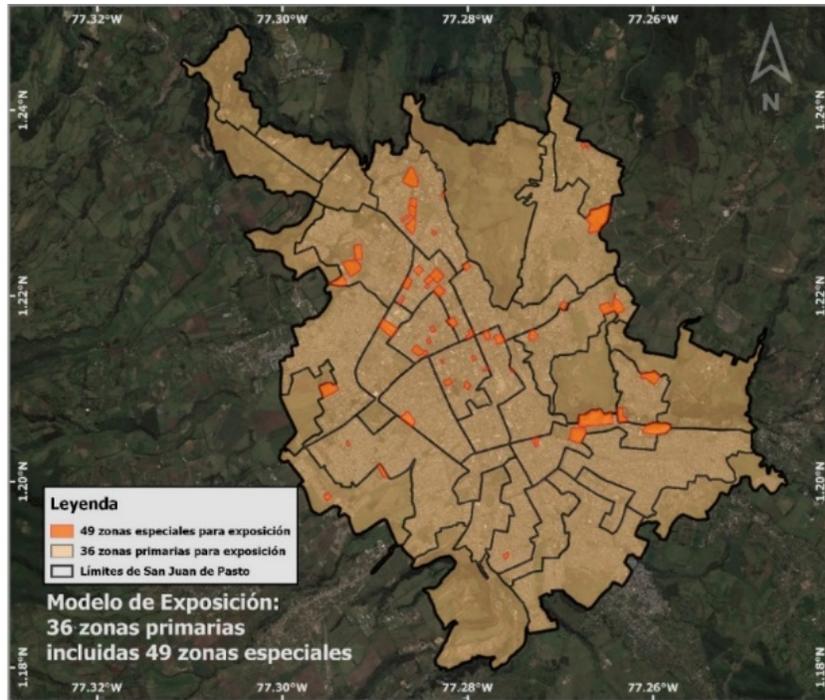


Figura 11. Zonificación de la ciudad para el modelo de exposición

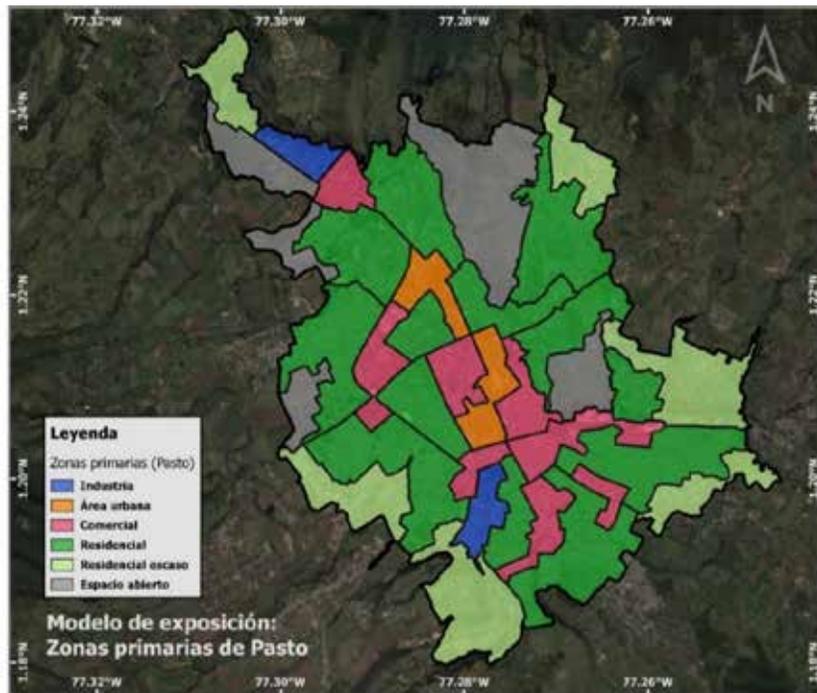


Figura 12. Distribución espacial de las zonas primarias por uso de suelo



Figura 13. Distribución espacial de las zonas especiales por uso de suelo



Figura 14. Sistema de numeración usado en zonas primarias

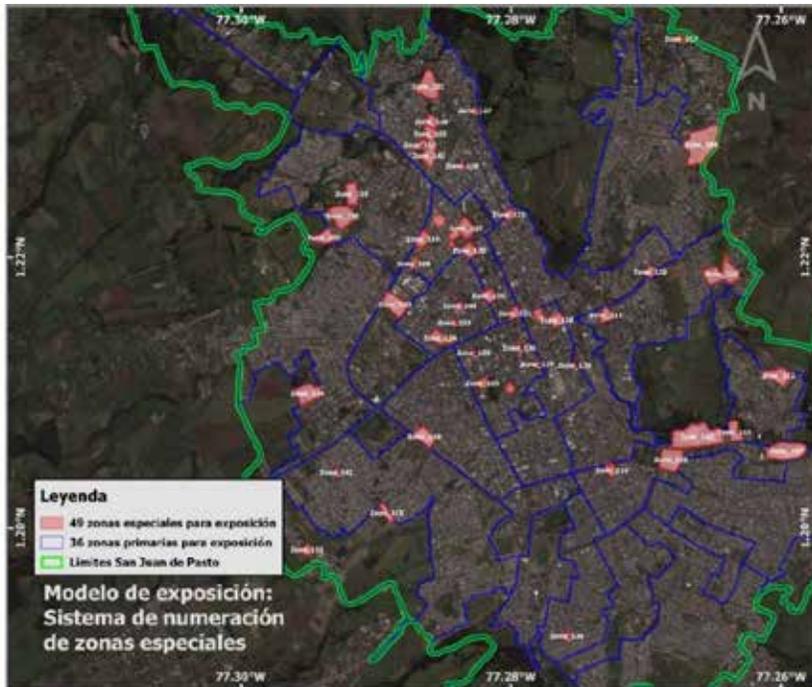


Figura 15. Sistema de numeración usado en zonas especiales

3.4.2 Distribución de las Edificaciones de Pasto

La Tabla 10 y Tabla 11 exponen la distribución de edificaciones en varias zonas primarias y zonas especiales, respectivamente. La información del censo de la ciudad y las imágenes satelitales fueron usadas para estimar el número y el área base de las edificaciones de baja, media y elevada altura en cada zona.

Tabla 10. Distribución de edificaciones y uso de suelo para zonas primarias

Propiedades en la zona			Edificaciones*				Área base de la edificación (m ²)			
No.	Uso primario de suelo	Area, m ²	B	M	E	Total	B	M	E	Total
1	Industria	334,922	290	8	0	298	36,027	191	0	36,218
2	Industria	392,038	1,451	25	1	1,477	87,652	1,037	56	88,746
3	Área urbana	369,481	1,362	191	1	1,554	107,884	20,219	115	128,219
4	Área urbana	532,805	2,499	203	0	2,702	219,291	27,646	0	246,938
5	Comercial	348,009	269	5	0	274	45,104	3,721	0	48,824
6	Comercial	434,187	2,130	194	8	2,332	199,136	19,093	2,002	220,231
7	Comercial	486,759	1,048	65	2	1,115	93,043	5,272	571	98,885
8	Comercial	440,827	2,250	112	0	2,362	170,366	7,869	0	178,235
9	Comercial	476,231	2,501	50	3	2,554	157,086	3,684	1,079	161,849
10	Comercial	231,563	821	14	0	835	67,735	1,087	0	68,822

* B, M, and E denotan Altura baja (1–3 pisos), Altura media (4–7 pisos), y altura elevada (8+ pisos), respectivamente.

Tabla 10. Distribución de edificaciones y uso de suelo para zonas primarias

Propiedades en la zona			Edificaciones*				Área base de la edificación (m ²)			
No.	Uso pirmario de suelo	Area, m ²	B	M	E	Total	B	M	E	Total
11	Comercial	202,908	1,318	31	0	1,349	68,645	1,129	0	69,774
12	Comercial	444,579	1,552	36	0	1,588	123,570	1,997	0	125,567
13	Residencial	962,914	3,697	249	29	3,975	258,539	29,872	4,249	292,661
14	Residencial	948,566	3,981	153	2	4,136	219,231	13,703	1,481	234,415
15	Residencial	1,226,953	6,575	14	0	6,589	302,390	443	0	302,833
16	Residencial	370,228	1,997	184	1	2,182	146,815	21,917	97	168,829
17	Residencial	1,164,147	7,363	133	8	7,504	351,103	9,551	1,772	362,425
18	Residencial	728,577	3,481	73	0	3,554	169,388	3,489	0	172,876
19	Residencial	621,373	3,990	121	0	4,111	254,038	9,829	0	263,867
20	Residencial	371,491	2,384	48	2	2,434	107,668	2,908	537	111,113
21	Residencial	1,423,683	9,810	216	1	10,027	485,037	10,198	19	495,255
22	Residencial	466,860	4,110	57	0	4,167	217,135	2,315	0	219,450
23	Residencial	1,266,658	12,925	240	0	13,165	578,738	8,568	0	587,306
24	Residencial	1,284,494	8,408	100	0	8,508	375,484	4,280	0	379,764
25	Residencial	606,587	3,176	147	5	3,328	230,221	21,039	1,255	252,515
26	Residencial escaso	535,569	145	1	0	146	13,532	22	0	13,554
27	Residencial escaso	622,288	1,361	0	0	1,361	69,851	0	0	69,851
28	Residencial escaso	1,201,190	534	1	0	535	34,633	11	0	34,645
29	Residencial escaso	554,115	1,056	3	0	1,059	58,029	641	0	58,670
30	Residencial escaso	803,878	759	154	0	913	45,417	9,130	0	54,547
31	Residencial escaso	1,254,663	415	0	0	415	26,949	0	0	26,949
32	Espacio abierto (otro)	586,764	3	0	0	3	3,370	0	0	3,370
33	Espacio abierto (otro)	1,946,232	76	0	0	76	4,097	0	0	4,097
34	Espacio abierto (otro)	353,693	5	0	0	5	2,058	0	0	2,058
35	Espacio abierto (otro)	626,226	9	0	0	9	1,244	0	0	1,244
36	Espacio abierto (otro)	356,017	11	0	0	11	1,428	0	0	1,428
Total		24,977,476	93,762	2,828	63	96,653	5,331,935	240,861	13,234	5,586,030

Tabla 11. Distribución de edificaciones y uso de suelo para zonas especiales

Propiedades en la zona			Edificaciones [†]				Área base de la edificación (m ²)			
No.‡	Uso pirmario de seulo	Area, m ²	B	M	E	Total	B	M	E	Total
101	Complejo de altura elevada	27,805	7	0	33	40	274	0	4,228	4,502
102	Complejo de altura elevada	9,370	1	5	5	11	54	725	896	1,675
103	Complejo de altura elevada	3,451	3	0	11	14	65	0	855	920
104	Complejo de altura elevada	60,163	8	70	0	78	637	14,971	0	15,608
105	Complejo de altura elevada	14,122	0	0	5	5	0	0	3,315	3,315
106	Complejo de altura elevada	7,300	5	10	9	24	398	625	738	1,761
107	Complejo de altura elevada	9,873	9	0	4	13	914	0	406	1,320
108	Complejo de altura elevada	7,668	26	2	2	30	1,708	46	797	2,551
109	Complejo de altura elevada	3,599	12	0	2	14	818	0	620	1,438
110	Complejo de altura elevada	34,022	0	0	21	21	0	0	5,956	5,956
111	Complejo de altura elevada	9,144	0	0	15	15	0	0	3,256	3,256
112	Complejo de altura elevada	20,889	4	0	11	15	326	0	3,537	3,863
113	Complejo de altura elevada	13,650	0	0	3	3	0	0	3,758	3,758
114	Complejo de altura elevada	3,535	6	0	2	8	2,954	0	1,452	4,407
115	Complejo de altura elevada	7,480	0	0	5	5	0	0	2,652	2,652
116	Complejo de altura elevada	4,917	0	0	2	2	0	0	1,375	1,375
117	Hospital grande	3,024	6	0	0	6	426	0	0	426
118	Hospital grande	7,746	4	3	0	7	434	643	0	1,077
119	Hospital grande	14,623	11	1	0	12	2,767	1,650	0	4,417
120	Hospital grande	27,629	14	0	0	14	9,184	0	0	9,184
121	Hospital grande	5,507	2	0	0	2	2,975	0	0	2,975
122	Hospital grande	5,644	13	0	0	13	2,023	0	0	2,023

[†] B, M, and E denotan Altura baja (1–3 pisos), Altura media (4–7 pisos), y altura elevada (8+ pisos), respectivamente.

[‡] Las zonas sombreadas fueron usadas para contar la población total de la edificación pero no fueron directamente inspeccionadas debido a su similitud con otras zonas inspeccionadas con el mismo uso de suelo.

Tabla 11. Distribución de edificaciones y uso de suelo para zonas especiales

Propiedades en la zona			Edificaciones [†]				Área base de la edificación (m ²)			
No.‡	Uso pirmario de suelo	Area, m ²	B	M	E	Total	B	M	E	Total
123	Hospital grande	971	3	0	0	3	491	0	0	491
124	Hospital grande	25,227	18	0	0	18	8,125	0	0	8,125
125	Hospital grande	28,733	10	2	0	12	6,538	3,517	0	10,055
126	Hospital grande	3,110	3	2	0	5	830	277	0	1,106
127	Iglesia grande	1,803	1	0	0	1	690	0	0	690
128	Iglesia grande	1,829	2	0	0	2	953	0	0	953
129	Iglesia grande	16,110	25	0	0	25	4,230	0	0	4,230
130	Iglesia grande	10,144	5	0	0	5	3,966	0	0	3,966
131	Iglesia grande	9,255	27	0	0	27	4,132	0	0	4,132
132	Iglesia grande	5,943	6	0	0	6	3,108	0	0	3,108
133	Iglesia grande	2,211	3	0	0	3	478	0	0	478
134	Iglesia grande	12,356	10	0	0	10	9,236	0	0	9,236
135	Iglesia grande	5,417	3	0	0	3	3,416	0	0	3,416
136	Iglesia grande	2,084	6	0	0	6	1,135	0	0	1,135
137	Iglesia grande	1,646	3	0	0	3	1,469	0	0	1,469
138	Iglesia grande	10,551	9	0	0	9	5,866	0	0	5,866
139	Iglesia grande	1,107	1	0	0	1	863	0	0	863
140	Iglesia grande	2,269	3	0	0	3	1,012	0	0	1,012
141	Iglesia grande	1,637	1	0	0	1	339	0	0	339
142	Centro comercial grande	13,901	28	1	0	29	7,730	275	0	8,004
143	Centro comercial grande	24,214	2	0	0	2	13,049	0	0	13,049
144	Centro comercial grande	3,357	1	0	0	1	3,985	0	0	3,985
145	Centro comercial grande	6,872	15	5	0	20	3,344	280	0	3,624
146	Centro comercial grande	4,586	3	0	0	3	2,274	0	0	2,274
147	Centro comercial grande	37,113	1	0	0	1	12,832	0	0	12,832
148	Centro comercial grande	63,206	28	0	0	28	25,650	0	0	25,650
149	Centro comercial grande	15,686	4	0	0	4	8,689	0	0	8,689
Total		612,500	352	101	130	583	160,392	23,009	33,841	217,242

La Tabla 12 muestra el número acumulado calculado y el área edificada de la Tabla 10 y Tabla 11. Usando la información del censo y de la ciudad, puede calcularse entonces el área total construida y el número promedio de pisos por edificación, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 12. Número total y área base de las edificaciones en todas las zonas

Zona	Area, m ²	Número de edificaciones				Área base de la edificación (m ²)			
		B	M	E	Total	B	M	E	Total
Zona primaria	24,977,476	93,762	2,828	63	96,653	5,331,935	240,861	13,234	5,586,030
Zona especial	612,500	352	101	130	583	160,392	23,009	33,841	217,242
Total	25,589,976	94,114	2,929	193	97,236	5,492,326	263,870	47,075	5,803,272

Tabla 13. Área total de las edificaciones y número promedio de pisos

Zona	Area, m ²	Área total construida (m ²)				Número promedio de pisos			
		B	M	E	Total	B	M	E	Total
Zona primaria	24,977,476	8,782,244	1,148,779	128,032	10,059,056	1.65	4.77	9.67	1.80
Zona especial	612,500	272,326	132,295	352,696	757,317	1.70	5.75	10.42	3.49
Total	25,589,976	9,054,570	1,281,074	480,728	10,816,373	1.65	4.85	10.21	1.86

3.5 Edificaciones inspeccionadas

3.5.1 Generalidades

Las inspecciones a edificaciones fueron llevadas a cabo por seis equipos multidisciplinarios de evaluadores. Antes de la puesta en marcha del programa, los ingenieros de Miyamoto capacitaron a los asesores, para garantizar que una alta confiabilidad y uniformidad se mantuviese durante la recolección de datos. Con el fin de minimizar los errores humanos, toda la información fue recolectada electrónicamente – en el Apéndice B se expone una discusión detallada acerca del margen de error esperado (*E*) y acerca de la exactitud de los datos de la inspección.

3.5.2 Distribución espacial de las edificaciones inspeccionadas

El modelo de exposición incluye información de las 2,084 edificaciones que fueron inspeccionadas en el campo. La distribución espacial de estas construcciones se ilustra en la Figura 16. La Tabla A.14 presenta información detallada de los edificios inspeccionados.



Figura 16. Distribución espacial de las 2,084 edificaciones inspeccionadas

3.5.3 Distribución zonal de las edificaciones inspeccionadas

La Tabla 14 y Tabla 15 evidencian la distribución de las 2,084 edificaciones inspeccionadas para zonas primarias y zonas especiales, respectivamente. En total, fueron inspeccionadas aproximadamente el 2.1% de las edificaciones en zonas primarias (6.5% de área base de la edificación) y un 17% de las edificaciones en zona especiales (29% del área construida).

Tabla 14. Distribución de edificaciones inspeccionadas, zonas primarias

Zona	Edificaciones [§]				Área base de la edificación (m ²)			
	B	M	E	Total	B	M	E	Total
1	10	2	–	12	8,914	144	–	9,058
2	38	2	–	40	8,160	200	–	8,360
3	27	14	–	41	5,893	3,735	–	9,628
4	11	6	–	17	1,429	737	–	2,166
5	10	2	–	12	764	816	–	1,580
6	42	14	2	58	13,678	6,174	2,200	22,052
7	21	5	1	27	7,429	1,300	500	9,229
8	44	11	–	55	6,439	4,140	–	10,579
9	44	8	1	53	9,294	3,692	1,600	14,586
10	21	1	–	22	31,984	150	–	32,134
11	28	–	–	28	4,345	–	–	4,345
12	27	6	–	33	8,227	2,080	–	10,307
13	58	23	4	85	12,738	9,661	3,460	25,859
14	69	24	2	95	11,615	7,003	930	19,548
15	106	4	–	110	9,650	166	–	9,816
16	32	14	1	47	2,717	1,955	494	5,166
17	108	24	2	134	12,848	3,110	1,500	17,458
18	56	7	2	65	4,334	1,134	2,550	8,018
19	116	27	–	143	17,609	4,381	–	21,990
20	39	3	–	42	1,639	286	–	1,925
21	162	25	–	187	21,270	6,421	–	27,691
22	74	3	–	77	16,150	900	–	17,050
23	216	10	–	226	16,849	854	–	17,703
24	159	2	–	161	24,134	600	–	24,734
25	46	16	–	62	5,459	3,125	–	8,584
26	5	–	–	5	1,515	–	–	1,515
27	30	–	–	30	2,006	–	–	2,006
28	8	–	–	8	964	–	–	964
29	25	1	–	26	3,392	400	–	3,792
30	14	17	1	32	1,418	4,160	77	5,655
31	14	–	–	14	2,040	–	–	2,040
32	2	–	–	2	950	–	–	950
33	9	–	1	10	610	–	48	658
34	2	–	–	2	1,440	–	–	1,440
35	13	–	–	13	1,925	–	–	1,925
36	2	–	–	2	975	–	–	975

[§] B, M, and E denotan Altura baja (1–3 pisos), Altura media (4–7 pisos), y altura elevada (8+ pisos), respectivamente.

Tabla 15. Distribución de edificaciones inspeccionadas, zonas especiales

Zona**	Edificaciones††				Área base de la edificación (m ²)			
	B	M	E	Total	B	M	E	Total
101	2	–	10	12	912	–	8,406	9,318
102	–	–	–	–	–	–	–	–
103	–	–	–	–	–	–	–	–
104	–	16	–	16	–	8,168	–	8,168
105	–	–	–	–	–	–	–	–
106	–	3	3	6	–	538	2,349	2,887
107	–	–	–	–	–	–	–	–
108	–	–	–	–	–	–	–	–
109	–	–	–	–	–	–	–	–
110	–	–	7	7	–	–	1,610	1,610
111	–	–	–	–	–	–	–	–
112	–	–	–	–	–	–	–	–
113	–	–	–	–	–	–	–	–
114	–	–	1	1	–	–	–	–
115	–	–	2	2	–	–	1,110	1,110
116	–	–	–	–	–	–	–	–
117	3	–	–	3	234	–	–	234
118	3	1	–	4	2,223	1,000	–	3,223
119	–	–	–	–	–	–	–	–
120	–	–	–	–	–	–	–	–
121	2	–	–	2	1,790	–	–	1,790
122	–	–	–	–	–	–	–	–
123	1	–	–	1	400	–	–	400
124	7	–	–	7	5,576	–	–	5,576
125	2	2	–	4	700	7,100	–	7,800
126	1	1	–	2	600	805	–	1,405
127	–	–	–	–	–	–	–	–
128	2	–	–	2	342	–	–	342
129	5	1	–	6	1,125	55	–	1,180
130	–	–	–	–	–	–	–	–
131	–	–	–	–	–	–	–	–
132	–	–	–	–	–	–	–	–
133	–	–	–	–	–	–	–	–
134	–	–	–	–	–	–	–	–
135	2	–	–	2	1,525	–	–	1,525
136	–	–	–	–	–	–	–	–
137	–	–	–	–	–	–	–	–
138	2	–	–	2	3,650	–	–	3,650
139	–	–	–	–	–	–	–	–
140	1	–	–	1	1,260	–	–	1,260
141	1	–	–	1	500	–	–	500

** Las zonas sombreadas fueron usadas para contabilizar los habitantes de la edificación pero no fueron directamente inspeccionadas debido a su similitud con otras zonas inspeccionadas con el mismo uso de tierra.

†† B, M, and E denotan Altura baja (1–3 pisos), Altura media (4–7 pisos), y altura elevada (8+ pisos), respectivamente.

Tabla 15. Distribución de edificaciones inspeccionadas, zonas especiales

Zona**	Edificaciones**				Área base de la edificación (m ²)			
	B	M	E	Total	B	M	E	Total
142	6	1	–	7	937	738	–	1,675
143	–	–	–	–	–	–	–	–
144	1	–	–	1	2,000	–	–	2,000
145	3	3	–	6	2,660	1,500	–	4,160
146	2	–	–	2	3,300	–	–	3,300
147	1	–	–	1	–	–	–	–
148	–	–	–	–	–	–	–	–
149	1	–	–	1	–	–	–	–

3.5.4 Distribución del uso de suelos de las edificaciones inspeccionadas

La Figura 17 y Figura 18 muestran respectivamente, el porcentaje de edificaciones inspeccionadas (relativo al total) por cada tipo de patrón de uso de suelos para zonas primarias y zonas especiales.**

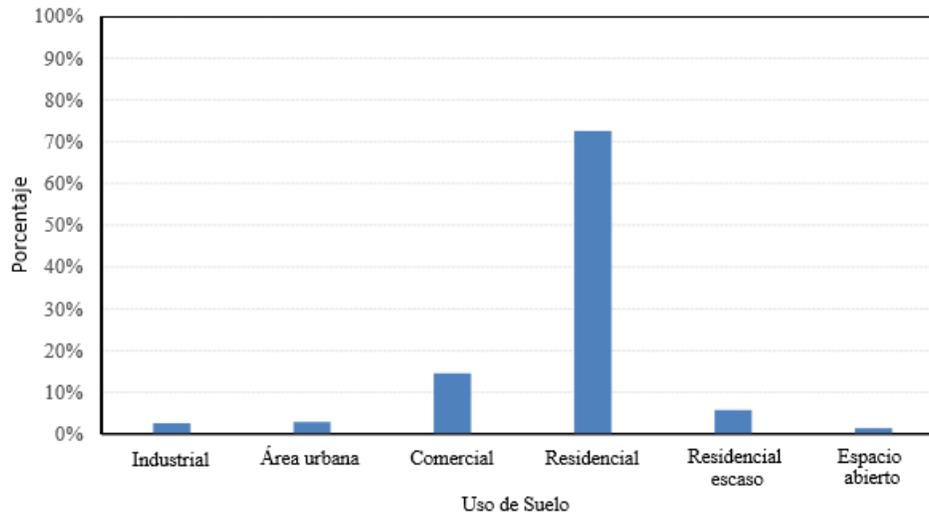


Figura 17. Composición de las edificaciones basado en el patrón de ocupación (normalizado)

** Las gráficas de basan en la información recolectada de las edificaciones inspeccionadas, y no en la Tabla 14 y Tabla 15.

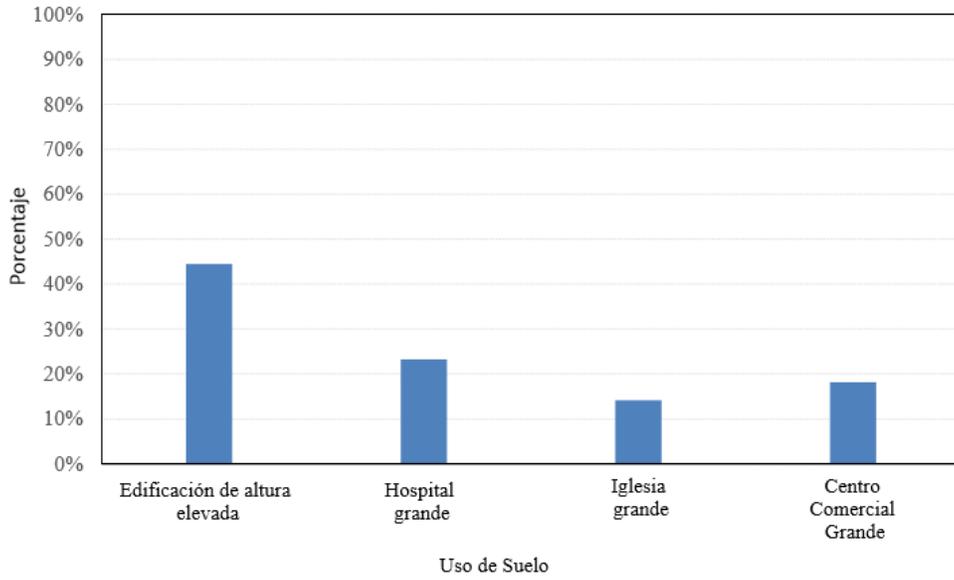


Figura 18. Porcentaje de edificaciones inspeccionadas, zonas primarias

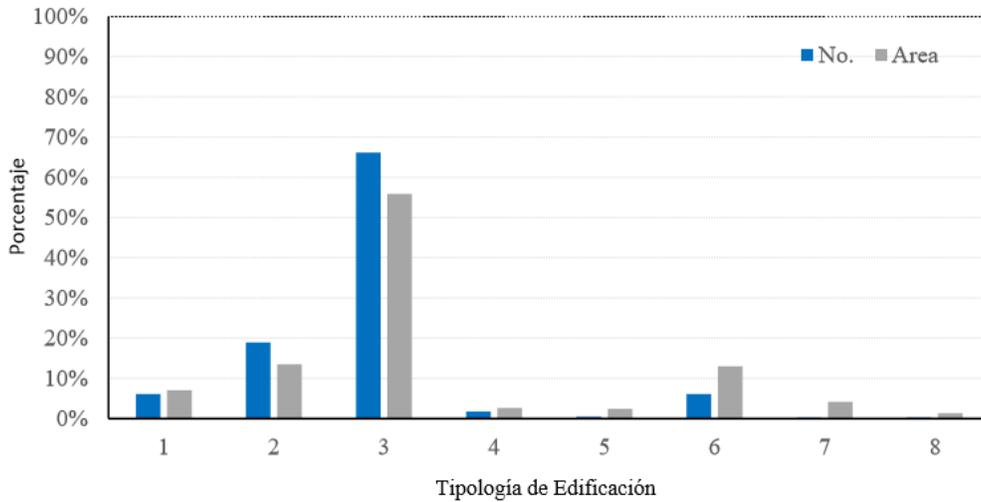


Figura 19. Porcentaje de edificaciones inspeccionadas, zonas especiales

3.6 Tipología de las Edificaciones y distribución de la ocupación del Modelo de exposición

Un total de 2,084 edificaciones fueron inspeccionadas e incluidas en grupos de exposición que fueron usados para el estudio. Las siguientes secciones proveen información acerca de la composición del modelo de exposición desarrollado.

3.6.1 Distribución de acuerdo al tipo de construcción

La Tabla 16 indica la composición del modelo de exposición basado en los ocho tipos de edificaciones.

La Figura 19 presenta la distribución de edificaciones en el modelo de exposición por tipo de edificación. Se suministra información tanto para el número de estructuras como para el área total de las estructuras. En la gráfica, los datos son normalizados ya sea para el número total o para el área de edificaciones.

Obsérvese que la mayoría de las edificaciones en el modelo de exposición corresponden a tipo 1, 2, 3 de baja altura (adobe, Mampostería no reforzada y Mampostería confinada respectivamente).

Tabla 16. Composición del modelo de exposición basado en el tipo de edificación

Tipo	Sistema de Resistencia a fuerza lateral (LFRS) y materiales	Edificaciones	
		Número	Área, m ²
1	Adobe (sin diseño técnico)	5,933	766,728
2	Mampostería no reforzada (URM) muro portante	18,381	1,461,696
3	Mampostería no reforzada (URM) con muro portante en concreto reforzado (RC), vigas de confinamiento y columnas adheridas (Mampostería confinada)	64,298	6,044,598
4	Pórtico de RC resistente a momento con relleno URM	1,749	288,002
5	Pórtico de RC resistente a momento con relleno URM	504	260,445
6	Pórtico de RC resistente a momento o Muro de cortante de RC	5,919	1,406,739
7	Pórtico de RC resistente a momento o Muro de cortante de RC	179	449,313
8	Acero de bajo calibre	273	138,852
Total		97,236	10,816,373

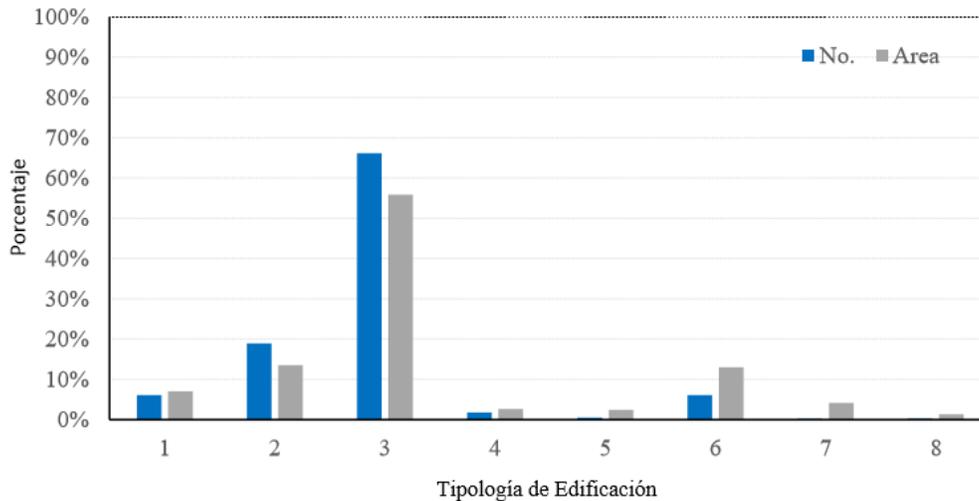


Figura 20. Composición de las edificaciones basado en tipología de edificación (normalizado)

3.6.2 Distribución de acuerdo al tipo de ocupación

La Tabla 17 corresponde a la composición del modelo de exposición basado en los tipos de ocupación que fueron definidos en la inspección de campo. La Figura 20 representa el porcentaje de cada tipo de ocupación en el grupo de edificaciones del modelo de exposición. La información se suministra tanto para el número de estructuras como para el área total de las estructuras. En la gráfica, los datos son normalizados ya sea para el número total o para el área de edificaciones.

Obsérvese que la ocupación de tipo residencial es la más prominente dentro de las edificaciones del modelo de exposición.

Tabla 17. Composición del modelo de exposición basado en el tipo de ocupación de la edificación

Anotación	Ocupación	Edificaciones	
		Número	Área, m ²
R	Residencial	86,926	8,941,558
C	Comercial	7,226	1,021,988
I	Industrial	629	146,864
H	Hospital	88	89,475
C	Oficina	577	99,412
P	Publico	161	31,726
E	Educación	1,253	341,013
P	Gobierno	69	42,133
P	Asamblea	166	70,279
X	Otro	56	22,703
X	Desconocido	85	9,222
Total		97,236	10,816,373

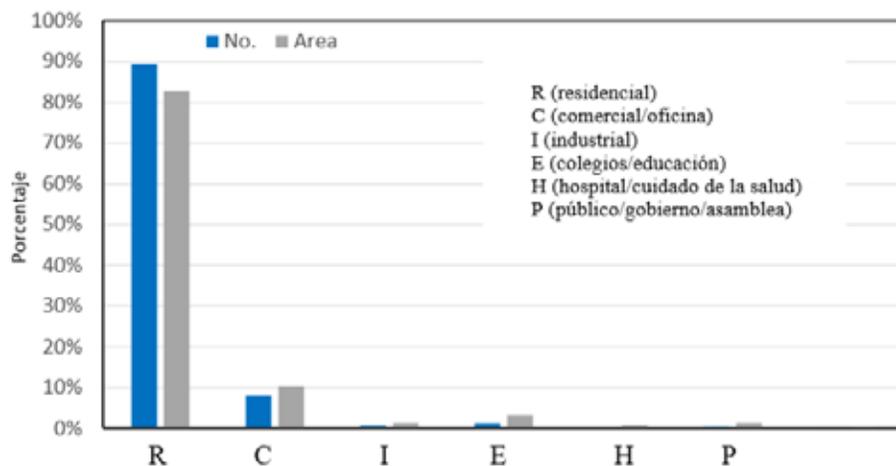


Figura 21. Composición de las edificaciones basado en el patrón de ocupación (normalizado)

3.6.3 Distribución de acuerdo a la altura de la edificación

La Tabla 18 describe la composición del modelo de exposición basado en la altura de la edificación. La Figura 21 presenta el porcentaje de altura de cada edificio en el grupo de edificaciones del modelo de exposición. La información se suministra tanto para el número de estructuras como para el área total de las estructuras. En la gráfica, los datos son normalizados ya sea para el número total o para el área de edificaciones.

Obsérvese que las edificaciones de Altura baja (de uno a tres pisos) contribuyen en un 97% aproximadamente, al número de edificaciones y 84% al área de edificaciones en el modelo de exposición.

Tabla 18. Composición del modelo de exposición basado en la altura de la edificación

Anotación	Ocupación	Edificaciones	
		Número	Área, m ²
Baja	Altura baja (1–3 pisos)	94,114	9,054,570
Media	Altura media (4–7 pisos)	2,929	1,281,074
Elevada	Altura elevada (8 o más pisos)	193	480,728
Total		97,236	10,816,373

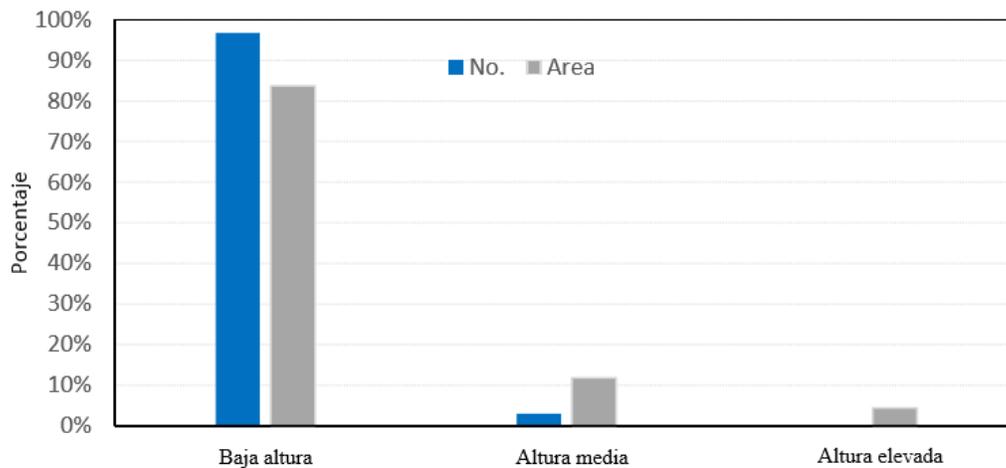


Figura 22. Composición de las edificaciones basado en número de pisos (normalizado)

La Tabla 19 resume los componentes del modelo de exposición de Pasto. Desde la Figura 22 hasta la Figura 25 se ilustran la distribución espacial de las edificaciones, del área total (construida) y de los ocupantes durante el día y durante la noche, respectivamente.

Tabla 19. Componentes esenciales del modelo de exposición de Pasto

Zona de la ciudad		Edificaciones		Ocupantes	
Primaria	Especial	No.	Área, m ²	Día	Noche
36	49	97,200	10,800,000	457,000	376,000

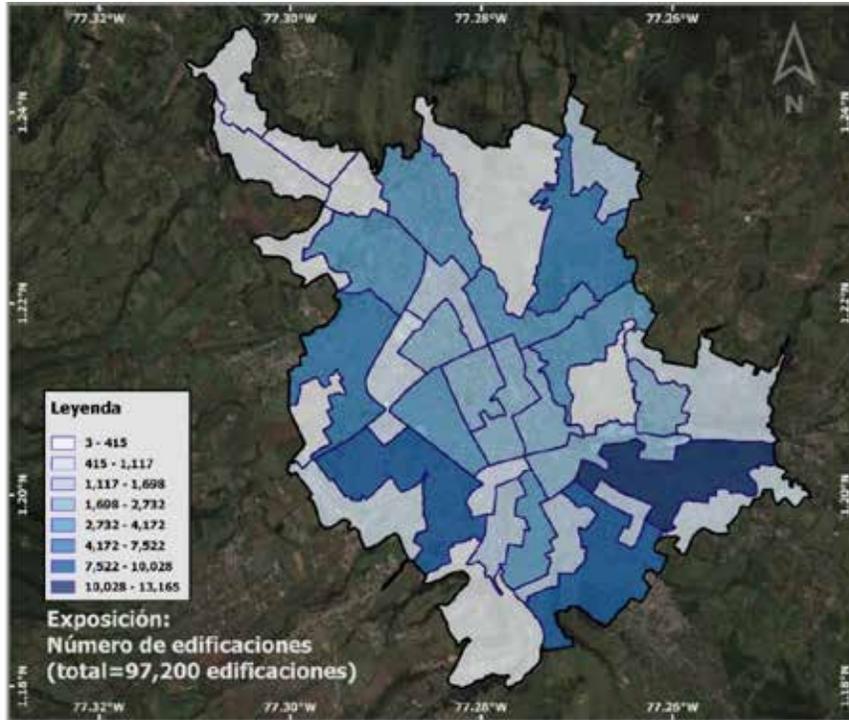


Figura 23. Distribución espacial del número de edificaciones

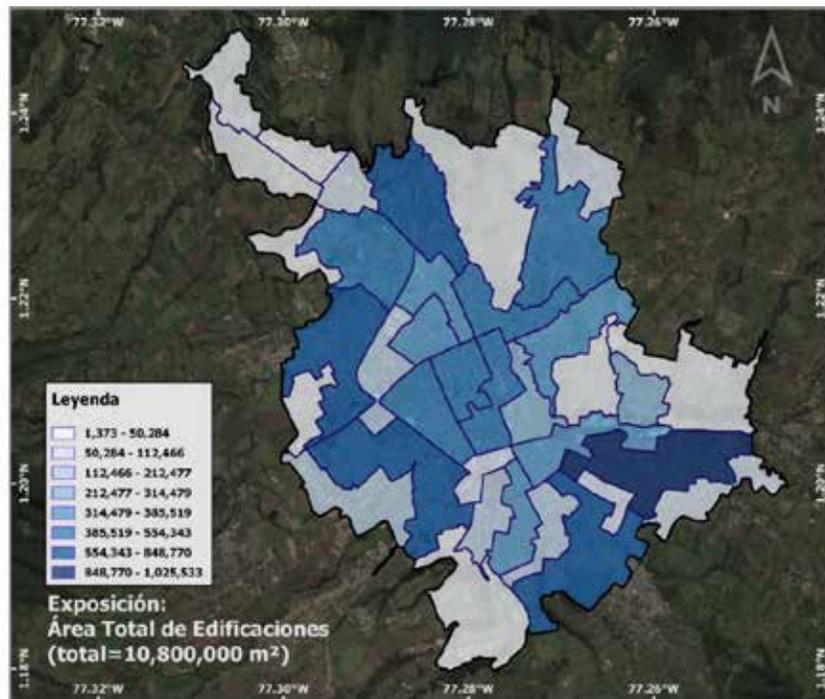


Figura 24. Distribución espacial del área total edificada

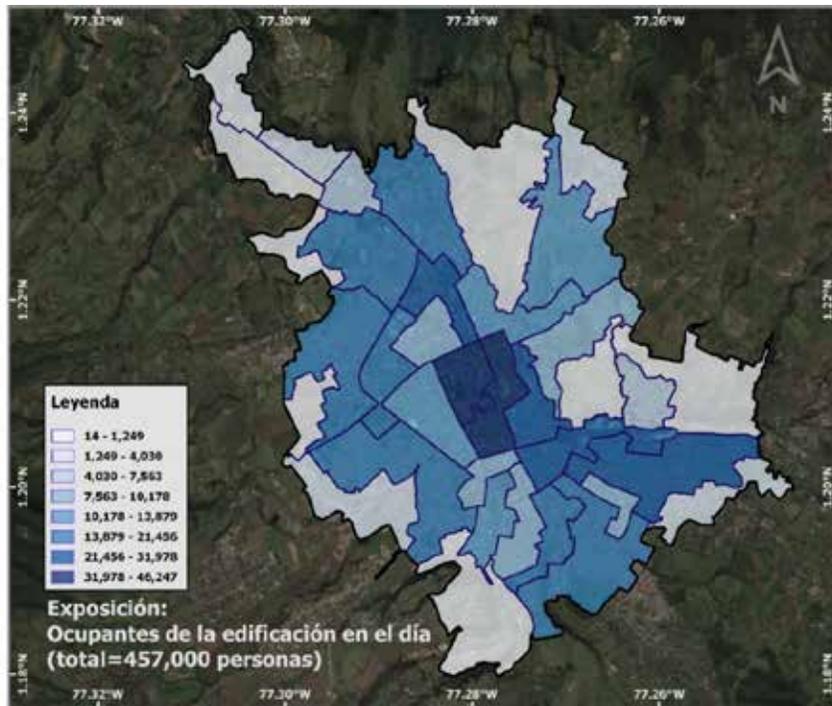


Figura 25. Distribución espacial del número de ocupantes durante el día

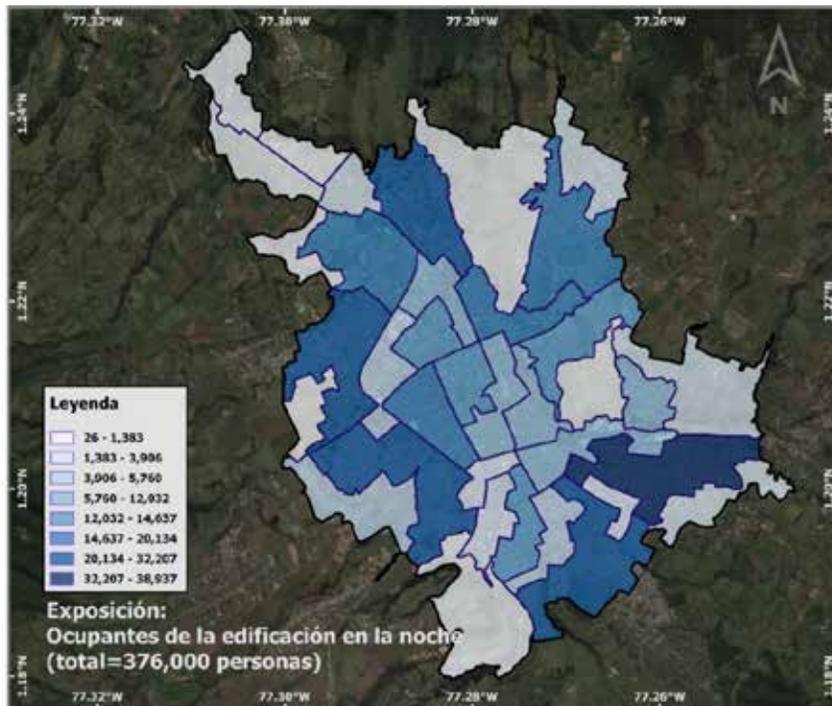


Figura 26. Distribución espacial del número de ocupantes durante la noche

4. FUNCIONES DE FRAGILIDAD Y DAÑO

4.1 Funciones de fragilidad de la edificación

4.1.1 Valores por defecto del modelo Hazus (Software) de FEMA (Agencia Federal de Manejo de Emergencias)

La metodología del modelo Hazus de la Agencia Federal de Manejo de Emergencias (FEMA 2001a) fue usada para clasificar los tipos de edificaciones en varias ubicaciones de fragilidad; ver Tabla 20.

Tabla 20. Clasificación de fragilidad de las edificaciones

Tipo	Sistema de Resistencia a fuerza lateral (LFRS) y materiales	Anotación de FEMA Hazus		
		Altura ^{§§}	Clasificación	Código ^{***}
1	Adobe (sin diseño técnico)	Baja	URML	Pre-
2	Mampostería no reforzada (URM) muro portante	Baja	URML	Bajo-
3	Mampostería no reforzada (URM) con muro portante en concreto reforzado (RC), vigas de confinamiento y columnas adheridas (Mampostería confinada)	Baja	RM1L	Bajo-/Moderado-
4	Pórtico de RC resistente a momento con relleno URM	Baja	C3L	Moderado-
5	Pórtico de RC resistente a momento con relleno URM	Media	C3M	Moderado-
6	Pórtico de RC resistente a momento o Muro de cortante de RC	Media	C1M or C2M	Moderado-
7	Pórtico de RC resistente a momento o Muro de cortante de RC	Elevada	C1H or C2H	Moderado-
8	Acero de bajo calibre	Baja	S3	Moderado-

Los valores por defecto (para Estados Unidos) para las funciones de fragilidad de PGA para los mencionados tipos de edificaciones del modelo Hazus para varios estados de daño (DSs) son presentados en la Tabla 21. Estas funciones de fragilidad son expresadas probabilísticamente por distribución semilogarítmica.

§§ Baja, Media y Elevada denotan Baja, Media y Elevada altura para 1-3, 4-7 y de 8 o más pisos, respectivamente.

*** La asignación de códigos representa el cumplimiento relativo esperado a los códigos modernos de diseño sísmico, adjudicación y construcción.

Tabla 21. Parámetros por defecto de la función de fragilidad del modelo Hazus de FEMA

Tipo	Media del Estado de Daño (DS median, g) ^{†††}				Ln (std. dev.)
	DS1	DS2	DS3	DS4	
1	0.13	0.17	0.26	0.37	0.64
2	0.14	0.20	0.32	0.46	0.64
3	0.18	0.23	0.36	0.64	0.64
4	0.15	0.27	0.42	0.74	0.64
5	0.14	0.23	0.46	0.83	0.64
6	0.14	0.24	0.52	0.96	0.64
7	0.12	0.21	0.49	0.91	0.64
8	0.13	0.19	0.33	0.60	0.64

El modelo Hazus de FEMA provee una narrativa descriptiva para cada estado de daño (DS) y para cada tipo de edificación. Por ejemplo, para una edificación de Mampostería no reforzada muro portante (URML), el documento señala:

DS Leve: fisuras finas en diagonal en la mampostería de las superficies de los muros; grietas más pronunciadas alrededor de las puertas, aberturas de las ventanas, en muros con grandes secciones de apertura; movimiento de los dinteles, grietas en la base de los antepechos.

DS Moderado: La mayoría de las superficies de los muros exhiben fisuras diagonales; algunos de los muros presentan grietas diagonales más grandes; los muros de mampostería pueden tener separaciones visibles de las membranas; agrietamiento significativo de los antepechos; trozos de mampostería puede desprenderse de los muros y los antepechos.

DS Considerable: En edificios con áreas relativamente grandes se presenta ruptura de muros, la mayoría de los muros han sufrido agrietamiento. Algunos antepechos y cubiertas a dos aguas han caído. Las vigas o cerchas se pueden haber movido en relación a sus soportes.

DS Total: La estructura ha colapsado o está en inminente peligro de colapsar debido a fallas dentro o fuera del plano de los muros. Se espera que aproximadamente el 15% del área total de edificaciones de Mampostería no reforzada con daño total, colapsen.

4.1.2 Modificaciones de la función de Fragilidad

Para considerar la fuente sísmica y la construcción en Pasto, la media de fragilidad por defecto del modelo Hazus de FEMA y las desviaciones estándar fueron modificadas como se describe en esta sección. Los valores por defecto de la media de Hazus corresponden a ciertos tipos de movimiento de suelos, como se observa en la Tabla 22.

^{†††} DS1 = Leve, DS2 = Moderado, DS3 = Considerable, and DS4 = Total (incluyendo colapso).

Tabla 22. Valores por defecto Hazus y características del movimiento del suelo en Pasto

Parámetro	Hazus (valores por defecto)	Pasto
Obra a fuente, km	≥ 80	≤ 10
Magnitud, Mw	7.0	6.5
Tipo de obra	D	D
Geografía	Occidente de Estados Unidos	Similar a WUS

Factores de modificación para los valores por defecto del modelo Hazus de FEMA incluidos:

- Factor para considerar 10-km distancia y Mw of 6.5 = 1.8 (FEMA 2001a)
- Factor para considerar el tipo de obra = $1.5/F_v$, donde $F_v = 1.9$ (ASCE 2010)

Por ende, el factor de corrección para los valores de la media desde la variación de movimiento del suelo fue computado a partir de:

$$\text{Eq. 1.} \quad \text{Factor} = (\text{Forma espectral en } \sim 10 \text{ km}) * (1.5/F_v) = 1.8 * (1.5/1.9) = 1.42$$

Además, los valores del modelo Hazus de FEMA fueron desarrollador para la construcción en E.E.U.U. y para las disposiciones del código del mismo país. Para considerar las variaciones de construcción entre E.E.U.U. y Pasto, otro factor de corrección (Valor de reducción de la media) de 0.85 fue aplicado a los valores de la media para todos los tipos de edificaciones. Este factor es similar a los factores de ajuste de Hazus que son usados para codificar modificaciones antiguas.

Por consiguiente, los valores de la media de Hazus serían modificados por un factor de 1.21 ($1.42 * 0.85$) para así obtener los valores correspondientes a los tipos de edificación del 3 al 8 en Pasto. Adicionalmente, las funciones de fragilidad existentes analizadas para edificaciones de Mampostería no reforzada en Antioquia, Colombia (Acevedo 2016), fueron referenciadas para la Mampostería no reforzada y para otras edificaciones más antiguas en este estudio, con el fin de considerar las características locales de estos edificios. Un factor de ajuste de 1.1 fue luego aplicado a los tipos 1 y 2, y un factor de 1.33 ($1.1 * 1.42 * 0.85$) fue usado para dichos tipos de edificaciones.

Asumiendo que las imprecisiones estén distribuidas independientes, el total de incertidumbre puede ser calculado de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de peligro y calidad de incertidumbre, o:

$$\text{Eq. 2.} \quad \beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{SH}^2 + \beta_{DC}^2}$$

La Tabla 23 muestra la modificación para la desviación estándar.

Tabla 23. Factores de ajuste para desviación estándar

Parámetro	Valor por defecto Hazus	Pasto
Peligro sísmico	0.5	0.5
Diseño/calidad de construcción	0.4	0.4/0.85
Total	0.64	0.687

4.1.3 Parámetros de Fragilidad para las edificaciones de Pasto

Los parámetros de la función de fragilidad modificados considerados aptos para Pasto y usados en el presente análisis, se encuentran en la Tabla 24.

Tabla 24. Parámetros de la función de fragilidad modificados para Pasto

Tipo	(Media del Estado de Daño) DS median, g				Std. dev. (ln)
	DS1	DS2	DS3	DS4	
1	0.173	0.226	0.345	0.492	0.687
2	0.186	0.266	0.425	0.611	0.687
3	0.217	0.282	0.435	0.777	0.687
4	0.186	0.324	0.513	0.889	0.687
5	0.166	0.281	0.559	0.997	0.687
6	0.169	0.284	0.628	1.154	0.687
7	0.139	0.248	0.592	1.093	0.687
8	0.157	0.230	0.399	0.725	0.687

A partir de la Figura 26 hasta la Figura 33, se plantean una serie de diagramas para las diferentes funciones de fragilidad correspondientes a los ocho tipos de edificaciones que fueron estudiadas en este reporte. Las figuras fueron generadas usando los parámetros modificados de Pasto de la Tabla 24.

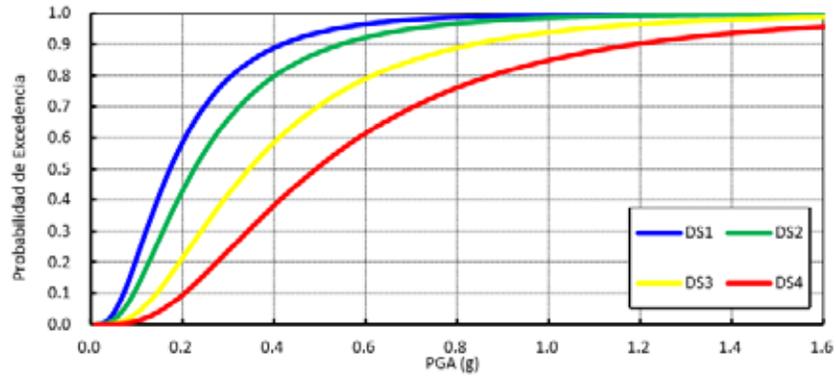


Figura 27. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 1 (adobe)

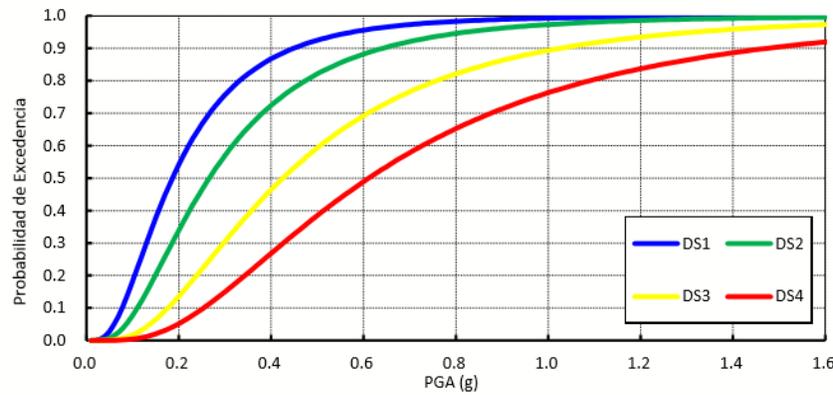


Figura 28. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 2 (Mampostería no reforzada Muro portante)

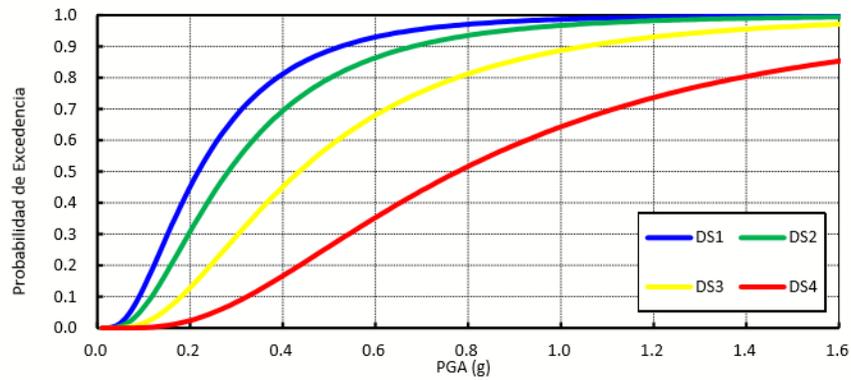


Figura 29. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 3 (Mampostería no reforzada y pódico de confinamiento de concreto Reforzado)

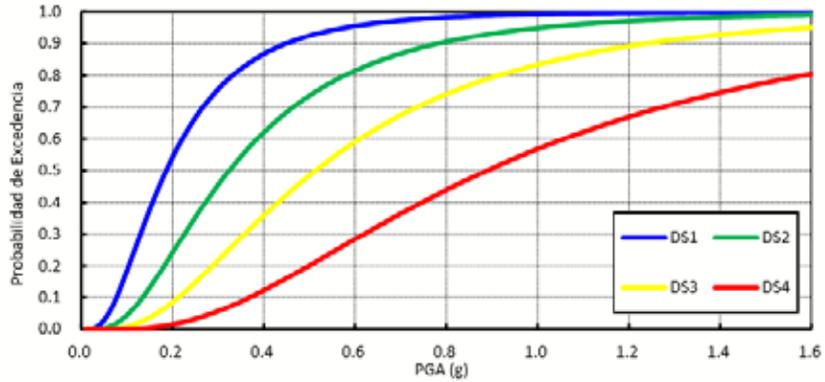


Figura 30. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 4 (Pórtico de Mampostería Reforzada y relleno de mampostería no reforzada, baja altura)

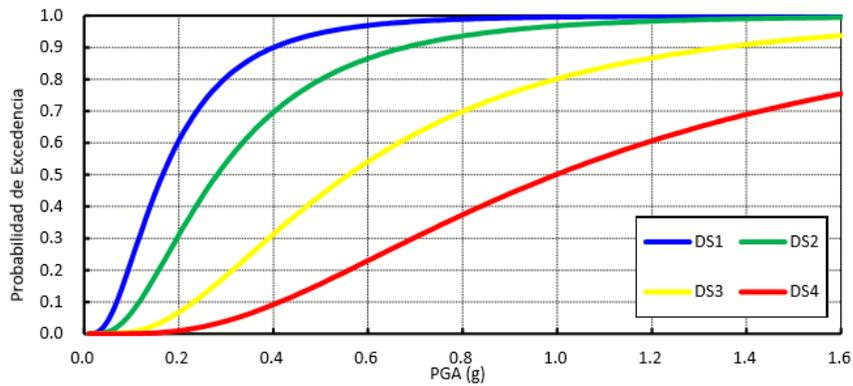


Figura 31. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 5 (Pórtico de Mampostería Reforzada y relleno de mampostería no reforzada, altura media)

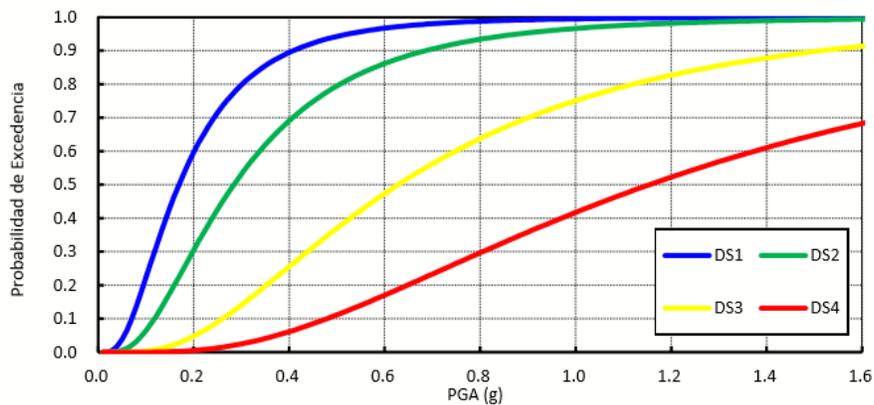


Figura 32. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 6 (Pórtico de Mampostería Reforzada o Muro de concreto reforzado, altura media)

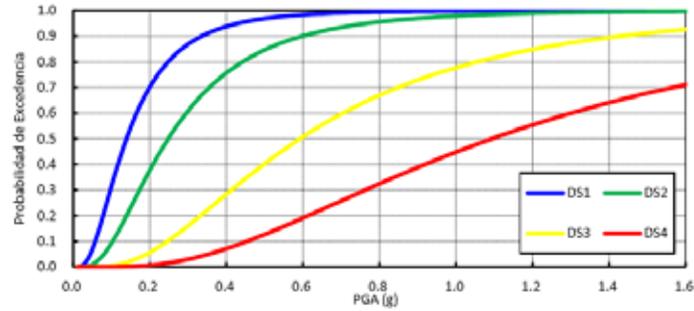


Figura 33. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 7 (Pórtico de Mampostería Reforzada o Muro de Concreto reforzado, altura elevada)

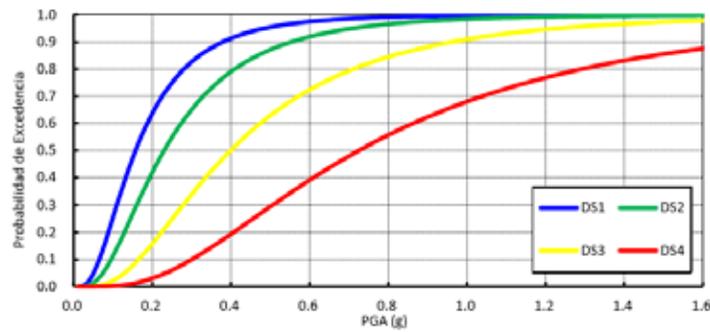


Figura 34. Funciones de Fragilidad para edificaciones tipo 8 (edificaciones de acero de bajo calibre)

4.2 Funciones de Consecuencia

4.2.1 Daño estructural

Las funciones de consecuencia que se refieren al daño estructural para estado de daño, se basaron en los valores modificados para Pasto del modelo Hazus de FEMA. La Tabla 25 indica los valores por defecto del modelo Hazus de FEMA para cociente de daño estructural para las tipologías de edificaciones que están en consideración.

Tabla 25. Cociente de daño estructural por defecto Hazus

Tipo	DS			
	DS1	DS2	DS3	DS4
1	0.02	0.10	0.40	1.00
2	0.02	0.10	0.40	1.00
3	0.02	0.10	0.40	1.00
4	0.02	0.10	0.40	1.00
5	0.02	0.10	0.40	1.00
6	0.02	0.10	0.40	1.00
7	0.02	0.10	0.40	1.00
8	0.02	0.10	0.40	1.00

Para la aplicación a Pasto, los cocientes de daño estructural fueron modificados. El cociente de daño estructural puede considerarse como proporcional a la pérdida económica y por consiguiente puede ser calculado usando la información consultada para la tasa de pérdida económica. La tasa de pérdida económica, r , se define como:

$$\text{Eq. 3.} \quad r = \frac{\text{Pérdida económica}}{\text{Exposición económica}}$$

Las tasas de pérdida económica, correspondiente al estado de daño, desarrolladas por el modelo Hazus de FEMA se fundamentan en información estadística de Estados Unidos. Así que un factor regional de modificación -basado en USGS et al. (2011) y en daño sísmico anterior en Colombia y Sur América- fue desarrollado para transformar el modelo Hazus adaptado a Pasto. La Figura 34, muestra las tasas de pérdida con respecto a la escala de Intensidad Mercalli Modificada (MMI) desarrollada por USGS.

$$\text{Eq. 4.} \quad r_{CO} = r_{US} * (\text{Factor regional de modificación})$$

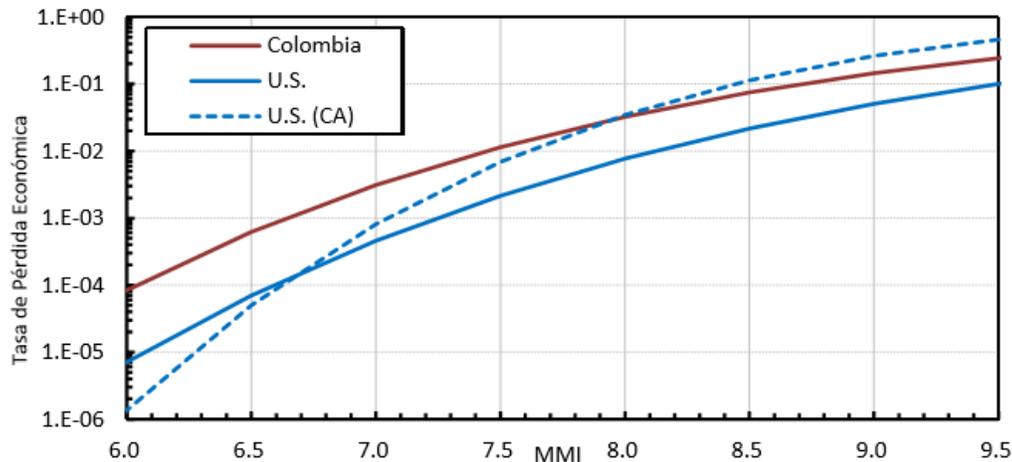


Figura 35. Tasas de pérdidas económicas previstas para los Estados Unidos y Colombia (USGS et al. 2011)

Para un sismo MMI de 7.5 a 8.0 (PGA de 0.27g a 0.37g) en Colombia, la Figura 34 estima un cociente de daño de 1% a 3% aproximadamente. Sin embargo, este coeficiente parece un poco bajo para Pasto y no parece justificar el gran colectivo de edificaciones de adobe y Mampostería no reforzada (URM) vulnerables en Pasto. Se ha experimentado más daño en sismos anteriores en Colombia. Por ejemplo, las pérdidas económicas del sismo de Paez en 1994 (Mw 6.8) fue apreciado en 42% y del sismo de Armenia en 199 fue estimado en 23%. Por tanto, este valor fue calibrado basado en los registros de daño sísmico que afectaron a construcciones similares; ver Tabla 26.

Tabla 26. Cociente de daño para sismos anteriores en Colombia y Sur América

Evento	MMI	Mw	r
1999 Armenia	7.4	6.2	23%
1994 Paez	8.8	6.8	42%
1983 Popayán	6.7	5.6	7%
2016 Ecuador	8.0	7.8	15%

Los cocientes de daño por defecto del modelo Hazus fueron entonces modificados de la siguiente manera: (1) tipo 1, edificaciones de adobe, sin cambio; (2) del tipo 2 al 7, se aplica un factor de modificación regional del 1.125 desde el DS1 hasta el DS3; y (3) tipo 8, se aplica un factor de modificación del 0.875.

Los cocientes de daño modificados que fueron usados en este estudio se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Cocientes de daño estructural modificados que fueron usados para Pasto

Tipo	DS			
	DS1	DS2	DS3	DS4
1	0.0200	0.1000	0.40	1.00
2	0.0225	0.1125	0.45	1.00
3	0.0225	0.1125	0.45	1.00
4	0.0225	0.1125	0.45	1.00
5	0.0225	0.1125	0.45	1.00
6	0.0225	0.1125	0.45	1.00
7	0.0225	0.1125	0.45	1.00
8	0.0175	0.0875	0.35	1.00

Para la evaluación de la clasificación de las edificaciones se asume que la categoría con calificación roja indica colapso o daño severo; la categoría con calificación amarilla indica daño moderado; y la categoría con calificación verde indica daño leve o sin daño.

4.2.2 Muertes (FEMA Hazus gravedad 4 y gravedad 3)

Las funciones de consecuencia que se referencian la tasa de fatalidad con estado de daño fueron basados en los valores del modelo Hazus de FEMA modificados para Pasto. La Tabla 28 presenta los cocientes por defecto del modelo Hazus de FEMA para los tipos de edificaciones que están en consideración.

Tabla 28. Tasas de mortalidad por defecto del modelo Hazus de FEMA

Tipo	DS			
	DS1	DS2	DS3	DS4
1	0%	0.00358%	0.00716%	4.52241%
2	0%	0.00260%	0.00520%	3.28400%
3	0%	0%	0.00331%	2.98473%
4	0%	0%	0.00240%	2.76700%
5	0%	0%	0.00280%	2.66740%
6	0%	0%	0.00240%	1.91800%
7	0%	0%	0.00260%	1.36900%
8	0%	0%	0.00200%	0.27040%

Para la aplicación a Pasto, los cocientes de muerte fueron modificados.

La tasa de moratalidad, v , se define como:

$$\text{Eq. 5.} \quad v = \frac{\text{Muertes}}{\text{Vulnerabilidad de la población}}$$

Las tasas de mortalidad que fueron desarrolladas por el modelo Hazus de FEMA se basan en información estadística de Estados Unidos. Por lo tanto, para convertir el modelo Hazus a Pasto se desarrolló un factor de modificación regional, basado en USGS et al. (2009) y en la mortalidad de sismos anteriores en Colombia y Sur América. La Figura 35 muestra las tasas de mortalidad desarrolladas por el USGS con respecta a las del MMI. .

$$\text{Eq. 6.} \quad v_{CO} = v_{US} * (\text{Factor de modificación Regional})$$

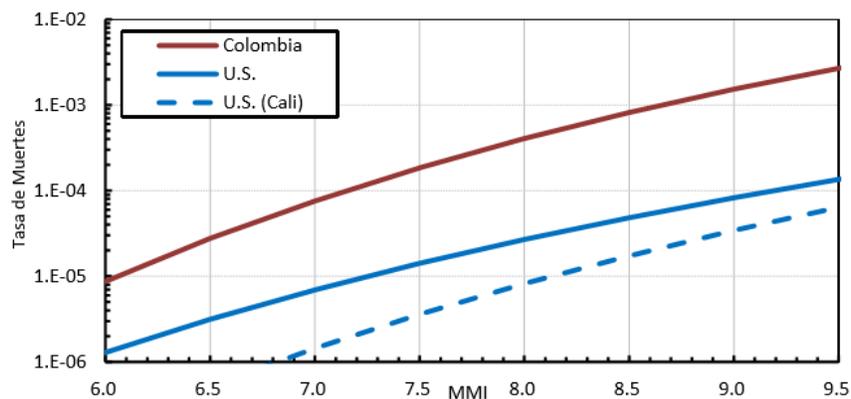


Figura 36. Tasas de mortalidad previstas para los Estados Unidos y Colombia, dada por la USGS (USGS et al. 2009)

Para un sismo en Colombia de MMI entre 7.5 hasta 8.0 (PGA de 0.27g a 0.37g), la gráfica estima un cociente de mortalidad de 0.02% a 0.04% aproximadamente. Sin embargo, este cociente es bajo para Pasto y parece no considerar el gran conjunto de edificaciones de adobe y URM vulnerables en Pasto. De hecho, en varios sismos en Colombia se han perdido más vidas. Por ejemplo, la tasa de mortalidad registrada en el sismo de Paez 1994 (Mw 6.8) fue del 2% y la del sismo de Armenia de 1999 se registró como el 0.5%. Por esto, se debe calibrar éste valor basado en estas historias de mortalidad sísmica que fueron causadas por construcciones similares; ver Tabla 29.

Tabla 29. Cociente de mortalidad de sismos anteriores en Colombia y Sur América

Evento	MMI	Mw	v
1999 Armenia	7.4	6.2	0.53%
1994 Paez	8.8	6.8	1.94%
1983 Popayán	6.7	5.6	0.26%
2016 Ecuador	8.0	7.8	0.02%–2.2%

Se modificaron los cocientes de mortalidad por defecto de Hazus multiplicándolos por un factor de 1.3 para todas las tipologías de edificaciones. Los cocientes de mortalidad resultantes que fueron usados en este estudio se encuentran en la Tabla 30.

Tabla 30. Tasas de mortalidad modificadas que fueron usadas para Pasto

Tipo	DS			
	DS1	DS2	DS3	DS4
1	0%	0.00462%	0.00925%	5.84145%
2	0%	0.00336%	0.00672%	4.24183%
3	0%	0%	0.00427%	3.85528%
4	0%	0%	0.00310%	3.57404%
5	0%	0%	0.00362%	3.44539%
6	0%	0%	0.00310%	2.47742%
7	0%	0%	0.00336%	1.76829%
8	0%	0%	0.00258%	0.34927%

4.2.3 Heridos (FEMA Hazus gravedad 2 y gravedad 1)

Las funciones de consecuencia que se relacionan tasa de heridos con DS se basaron en los valores modificados para Pasto del modelo Hazus de FEMA, usando el mismo procedimiento que para modificación de mortalidad. La Tabla 31 muestra los cocientes de heridos por defecto del Hazus de FEMA para los tipos de edificaciones que se están considerando en este estudio.

Tabla 31. Tasas de heridos por defecto del modelo Hazus de FEMA

Tipo	DS			
	DS1	DS2	DS3	DS4
1	0.07%	0.76%	3.94%	36.08%
2	0.05%	0.56%	2.86%	26.20%
3	0.07%	0.39%	1.82%	21.37%
4	0.05%	0.28%	1.32%	17.80%
5	0.05%	0.28%	1.54%	17.22%
6	0.05%	0.34%	1.32%	14.30%
7	0.05%	0.34%	1.43%	12.20%
8	0.05%	0.23%	1.10%	7.63%

Los cocientes de heridos deben ser modificados para la aplicación a Pasto. Se modificaron los cocientes de heridos por defecto de Hazus multiplicándolos por un factor de 1.3 (la misma modificación que para el cociente de mortalidad). Los cocientes de mortalidad resultantes que fueron usados en este estudio se encuentran en la Tabla 32.

Tabla 32. Tasas de heridos modificadas usadas para Pasto

Tipo	DS			
	DS1	DS2	DS3	DS4
1	0.09%	0.99%	5.09%	46.60%
2	0.06%	0.72%	3.69%	33.84%
3	0.09%	0.50%	2.35%	27.61%
4	0.06%	0.36%	1.71%	22.99%
5	0.06%	0.36%	1.99%	22.24%
6	0.06%	0.43%	1.71%	18.47%
7	0.06%	0.43%	1.85%	15.76%
8	0.06%	0.29%	1.42%	9.86%

4.2.4 Volumen de escombros

El volumen de escombros fue evaluado basado en la metodología que fue desarrollada en el terremoto de Haití en 2010 y fue calibrada con los volúmenes medidos en ese evento. La metodología fue modificada para corresponder a los tipos de construcción y materiales de Pasto. En este estudio se considera el volumen de escombros que se asume como resultado del daño de las edificaciones clasificadas en categoría roja.

El cálculo se basó en lo siguiente:

$$\text{Eq. 7.} \quad w = \frac{1}{A} * c_f N (c_s At + c_w Lht_w + c_m)$$

Donde:

- w = volumen de escombros en cada m^3 por m^2 de área del suelo de la edificación
- A = área base edificada en m^2
- N = número de pisos
- At = Volumen de losas de suelo por piso en m^3
- Lht_w = Volumen de muros por piso en m^3
- c_f, c_s, c_w, c_m = factores de ajuste

La Tabla 33 presenta el volumen de escombros que fue usado para cada tipología de edificación en Pasto.

Tabla 33. Volumen de escombros usado para Pasto

Tipo	Volumen de escombros, $m^3/(m^2$ del área del suelo)/piso
1	0.84
2	0.84
3	0.84
4	0.84
5	0.84
6	0.84
7	0.84
8	0.51

5. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE RIESGO

5.1 Generalidades

La Figura 36 consiste en un diagrama de flujo que fue usado para la evaluación del riesgo sísmico en Pasto. Como lo muestra el diagrama, la amenaza sísmica, información de fragilidad de las edificaciones y el modelo de exposición son insumos para para la máquina de cálculo. La máquina de cálculo OpenQuake que fue desarrollada por la fundación Modelo Global de Sismos (GEM 2016) para este proyecto fue usada como el módulo de procesamiento.



Figura 37. Diagrama de flujo para análisis

5.2 Algoritmo de Análisis de riesgo

La evaluación de riesgo probabilístico usó simulaciones Monte Carlo (MCSs). Se llevaron a cabo 10,000 MCS para que los resultados fuesen convergentes. El procedimiento de análisis de riesgo fue el siguiente (ver Figura 37):

- Seleccionar un escenario de sismo:
 - Determinar la intensidad sísmica del sitio
 - Usar datos de fragilidad y exposición para las edificaciones.
 - Ejecutar la máquina de cálculo OpenQuake y determinar la distribución del DS.
 - Calcular el daño estructural, muertes, heridos y volumen de escombros, usando las funciones de consecuencia y los DS obtenidos
- Repetir el proceso 10,000 veces.
- Calcular el valor esperado la media para las cantidades de interés.
- Procesar posteriormente e incrementar aumentar las zonas en Pasto.

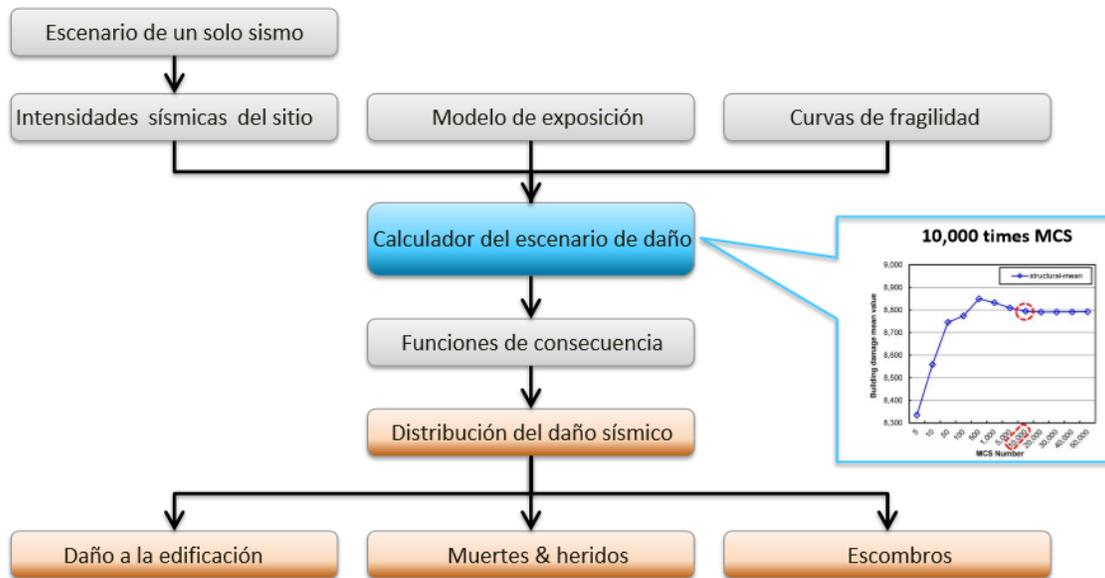


Figura 37. Flujo del proceso usando la máquina de cálculo de riesgo OpenQuake

5.3 Simulaciones Monte Carlo (MCS)

5.3.1 Generalidades

Durante el análisis, se asumió que la Intensidad Sísmica (PGA) tenía distribución semilogarítmica, y las variables aleatorias para PGA basadas en la distribución se generaron para todos los casos de MCS (10,000 variables en cada locación). La probabilidad de daño de la edificación fue estimada para cada caso, usando la variable de PGA y la función de fragilidad de la edificación representada por distribución semilogarítmica. En este proceso analítico se repitió el número específico de MCSs. Una vez completo, el valor de la media (esperada) del daño a edificaciones para todos los casos de simulación, se obtuvo para cada edificación mediante la aplicación de la función de resultado y estos valores de daño fueron agregados de acuerdo a la zona correspondiente.

5.3.2 Metodología

Para un sismo de intensidad determinada, el daño es probabilísticamente estimado a través del daño de la edificación aplicando distribución PGA y distribución de fragilidad de la edificación. Ya que la estimación del daño sísmico contiene varias incertidumbres se debe realizar una estimación probabilística para obtener el daño esperado, usando ya sea un método de aproximación teórica o un método de simulación numérica.

En este Proyecto se usó MCS un método de simulación matemática, para analizar el daño sísmico. La técnica de Monte Carlo es uno de los criterios de cálculo computarizado que depende de muestras aleatorias para obtener resultados numéricos. El propósito principal de las MCS es estimar el valor de la media y la variabilidad de la respuesta a un sistema complejo usando un subconjunto razonable del espacio de solución. Esta sección, está determinada mediante una muestra del espacio original, lo que significa que se requieren varias simulaciones para obtener resultados confiables.

Para este proyecto fue necesario determinar el número adecuado de simulaciones para obtener un resultado razonable, que sea convergente al valor de la media de daño sísmico. Los resultados para un rango de ejecuciones de la simulación son presentados en la Figura 38. Al observar la gráfica se encontró que los resultados varían sustancialmente cuando se ejecutan solamente un pequeño número de simulaciones (por ejemplo 5, 10, y 50 ejecuciones). Igualmente, la solución no es convergente con 100 y 500 simulaciones. La simulación es convergente al llevar a cabo 10,000 simulaciones (por ejemplo el resultado de 10,000 o más simulaciones es convergente).

A partir de esta investigación sobre la convergencia se encontró que 10,000 simulaciones ofrecen resultados razonablemente estables y fue seleccionada por la MCS para este proyecto. Aquí el estado de daño de la edificación se asumió al azar y fue probabilísticamente distribuido en la simulación para cada ejecución, así se calculó el valor de la media de daño sísmico mediante la aplicación de funciones de resultado.

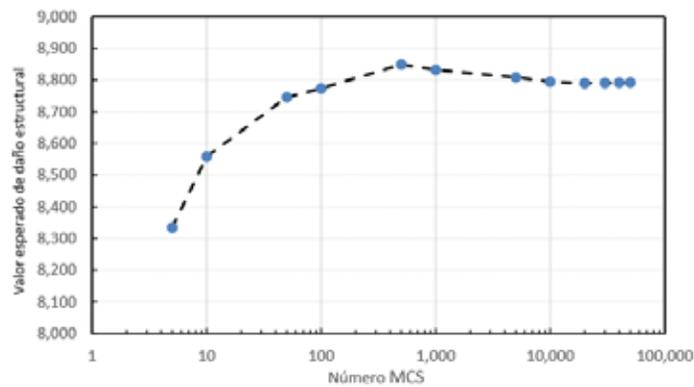


Figura 38. Investigación del número suficiente de MCSs para este proyecto

La Figura 39 representa los resultados de la MCS para una edificación modelo.^{***} Para esta edificación, los resultados aproximados de los estados de daño fueron de 1,400; 800; 2,350; 3,600 y 1,850; Sin Daño, Leve, Moderado, Considerable y Total respectivamente. Las distribuciones varían de una edificación a otra, dependiendo de la sismicidad del sitio y la fragilidad de la edificación.

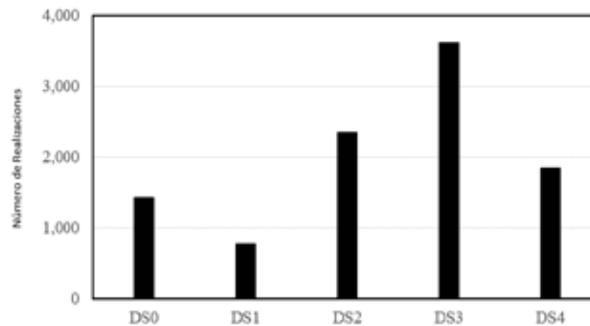


Figura 39. Distribución de resultados de MCS para una edificación de muestra

*** DS0=Sin daño

El diagrama de flujo en Figura 40 ilustra el procedimiento de estimación de daño para este proyecto usando MCS. Como se mencionó anteriormente en este reporte, el valor de la media (esperada) de daño estructural, muertes, heridos y volumen de escombros serán los parámetros de evaluación de riesgo fundamentales a usarse en esta evaluación.

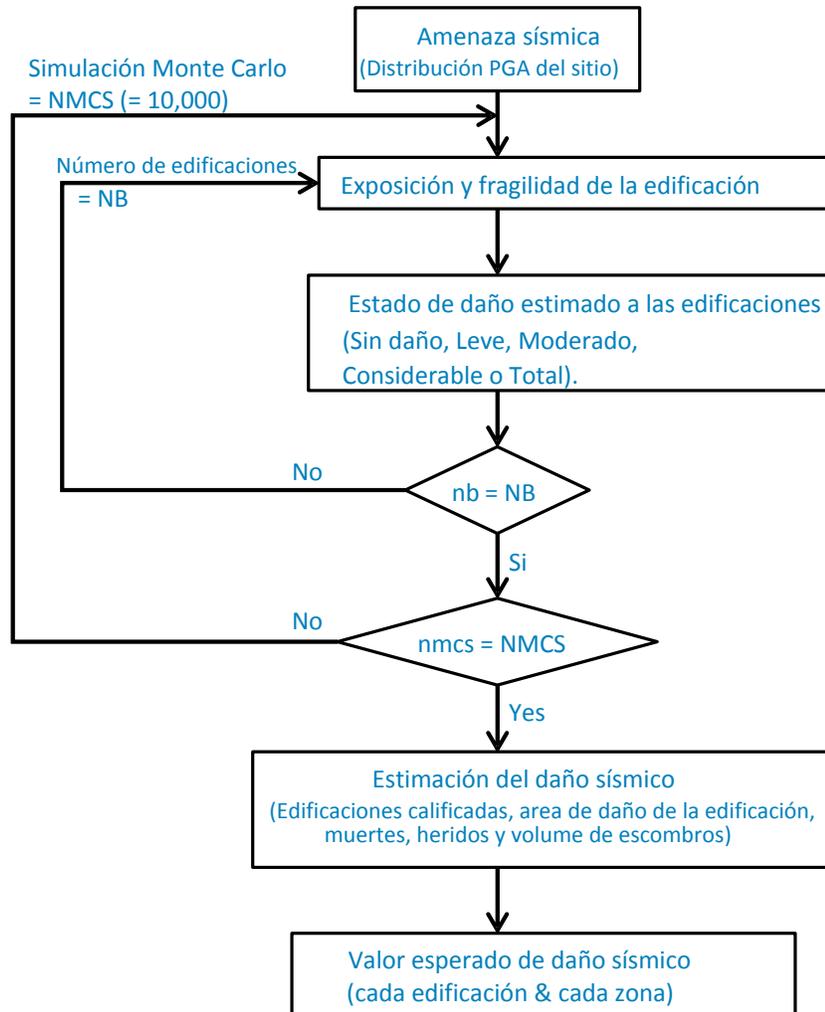


Figura 40. Diagrama de flujo de la estimación de daño sísmico para este proyecto

6. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE RIESGO

6.1 Generalidades

Para cada edificación se calculó la pérdida estimada (daño estructural, muertes, heridos y volumen de escombros) basado en el valor esperado (media) de 10,000 simulaciones Monte Carlo. Los resultados del análisis fueron expresados en valores relativos (probabilidad de daño). Luego se tradujo esta información a área dañada, muertes, heridos y volumen de escombros, usando el área base de la edificación, el número de pisos y el número de ocupantes. Entonces se acumularon los valores numéricos para cada zona, posteriormente se sumaron todas las zonas para obtener valores para Pasto. Adicionalmente, los diferentes estados de daño fueron agrupados en tres categorías que corresponden a los niveles esperados de daño post-sismo, calificación verde, calificación amarilla y calificación roja (FEMA 2001b). La información básica de exposición (número de edificaciones, área total y número de ocupantes) para las zonas se muestra en la Tabla A.2 y Tabla A.3 para zonas primarias y zonas especiales respectivamente.

6.2 Resultados

6.2.1 Generalidades

Las siguientes secciones presentan información acumulada para las zonas primarias en Pasto. Se presentan tanto porcentajes como valores absolutos. Desde la Tabla A.4 hasta la Tabla A.7 se presentan los valores tabulados esperados de daño físico y pérdidas humanas para las zonas primarias y zonas especiales, respectivamente.

6.2.2 Pérdidas humanas previstas (muertes y heridos)

Ya que no es posible saber cuándo ocurrirá un sismo, los valores estimados de muertes y heridos en esta sección se basan en valores promedio de muertes durante el día y durante la noche y heridos para cada zona. La Figura 41 muestra los cocientes de distribución de muertes y heridos para cada zona. El cociente de distribución de muertes tiene una tasa máxima del 2% para las zonas más afectadas y un valor promedio del 1%. Los cocientes correspondientes a heridos son aproximadamente del 16% y 9% respectivamente.

La Figura 42 muestra el promedio de distribución de muertes (en personas) para las zonas, organizadas por número de muertes. La línea punteada horizontal en el gráfico representa el valor promedio para todas las zonas. Cabe anotar que, para la mayoría de las zonas vulnerables, las muertes excedieron el valor promedio por un factor de 3 o 4, mientras que en casi 10 zonas las muertes esperadas son cinco o menos. Estos datos pueden ser utilizados para adjudicar recursos médicos y de emergencia para las áreas más vulnerables.

6.2.3 Daño previsto en Edificaciones (por categorías de calificación de color)

Después de un sismo, será llevada a cabo una inspección de daño a las áreas afectadas. En este punto, la distribución de las calificaciones por color asignadas (verde, amarillo, rojo, serán desarrolladas para las zonas seguras, limitadas y prohibidas para ocupación, respectivamente) es evaluada basada en el daño esperado de las edificaciones desde el diseño sísmico. La Figura 43 muestra la distribución de evaluación de calificación por color esperada para cada zona. Nótese que la distribución de cocientes de edificaciones calificadas como verde, amarillo, rojo es uniforme para la mayoría de las zonas. Sin embargo, para algunas zonas, se anticipa un daño extensivo.

Como se muestra en la Figura 44, para aproximadamente 33 zonas los edificios anticipadamente calificados como rojo, estarían en un rango de 0 a menor que 25% a 30% de la población de las edificaciones y aquellas edificaciones calificadas como rojo y amarillo estarían cerca de un 60%. No obstante, para un puñado de zonas se espera peor desempeño (tal como un alto porcentaje de edificaciones calificadas como rojo). Por tal motivo, se anticipan daño considerable y una alta tasa de mortalidad para estas locaciones. Esta información puede ser usada para enviar equipos de inspección a las zonas más adversamente afectadas para determinar si es seguro o no recuperar las edificaciones. Calificar las edificaciones que son seguras de ocupar rápida y eficientemente, puede reducir la necesidad de albergues temporales.

6.2.4 Daño previsto en Edificaciones (cociente de daño y volumen de escombros)

Después de un sismo, típicamente se realiza una evaluación de daños del área afectada para determinar el nivel de daño de las edificaciones. Usualmente también son necesarios equipos de remoción de escombros para permitir que la ciudad se recupere y regrese a su operación normal.

La Figura 45 presenta la distribución de daño esperado de las edificaciones para cada zona. Nótese que la distribución es uniforme en aproximadamente 45% o menos para la mayoría de las zonas. No obstante, para unas cuantas zonas se anticipa daño estructural más severo. La Figura 46 muestra la distribución organizada del volumen de escombros por zonas (m³). La línea punteada horizontal en la figura representa el valor promedio para todas zonas. Cabe observar que la cantidad de escombros para las zonas más afectadas es significativamente más elevada que el promedio. De la misma manera estas zonas tienen una combinación de más edificaciones y un cociente de daño mayor. Estos datos pueden ser usados para distribuir equipo de construcción y personal que asista la recuperación en las áreas más vulnerables.

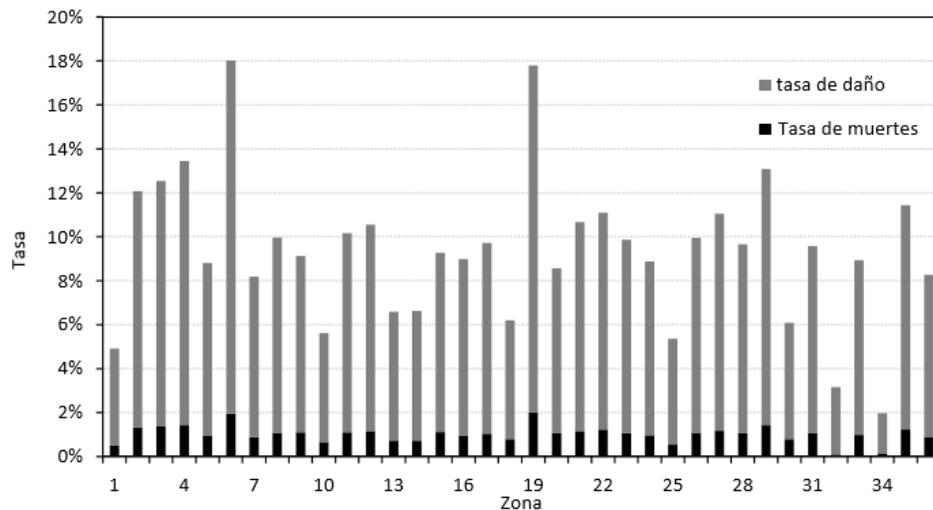


Figura 41. Cociente de heridos distribución de mortalidad por zonas primarias

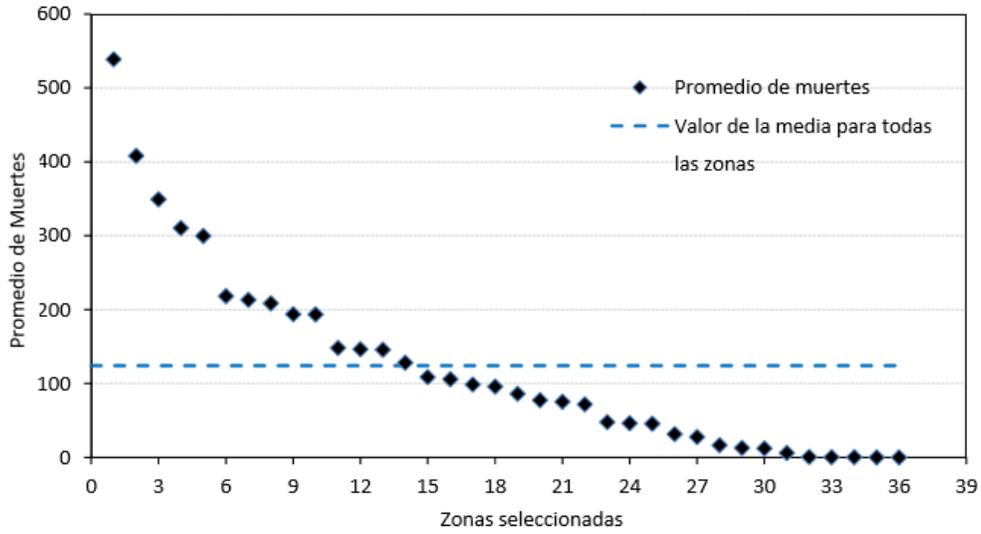


Figura 42. Distribución ordenada de muertes en zonas primarias

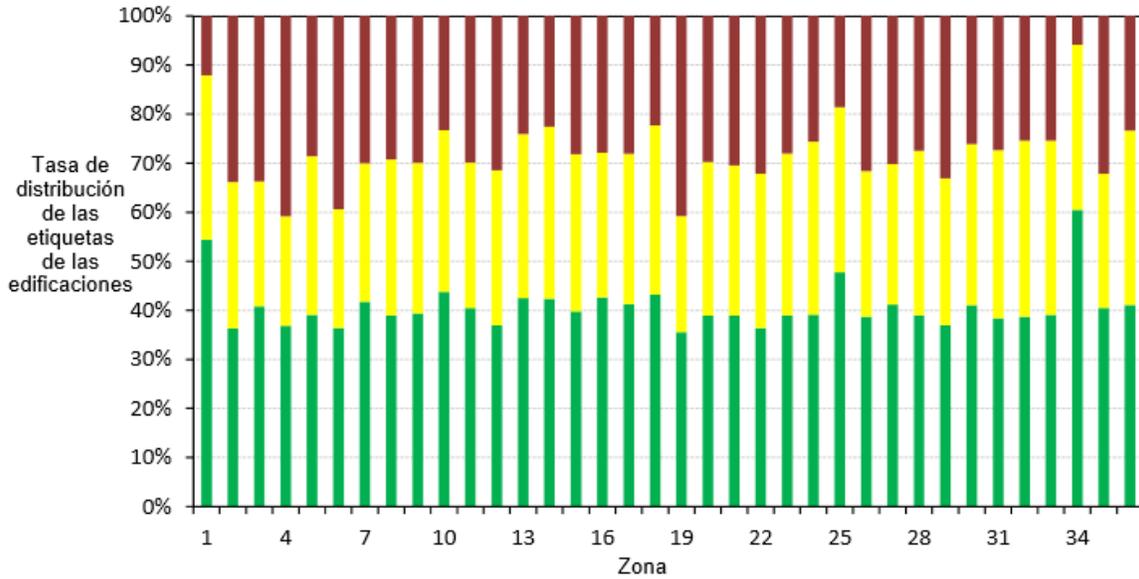


Figura 43. Distribución de categorías de daño a edificaciones para zonas primarias

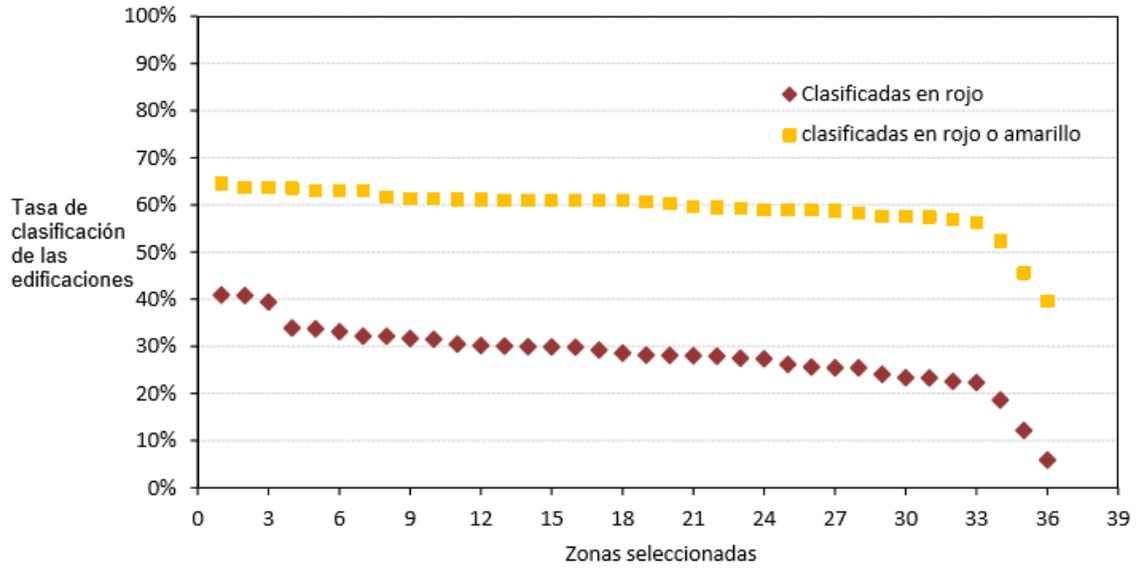


Figura 44. Distribución ordenada de edificaciones calificadas en rojo y en rojo o amarillo para zonas primarias

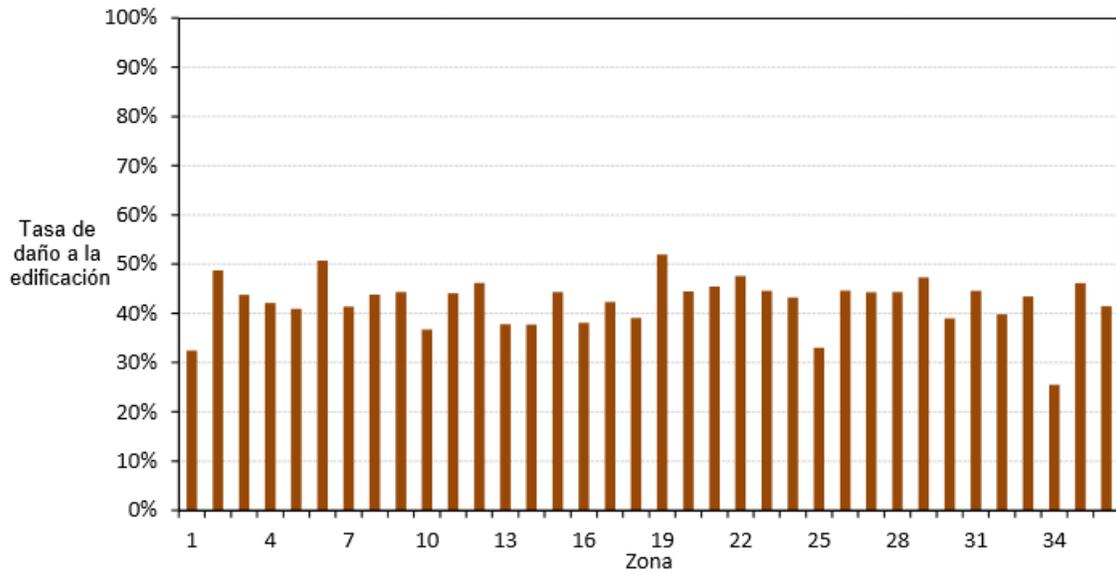


Figura 45. Distribución de cocientes de daño en edificaciones para zonas primarias

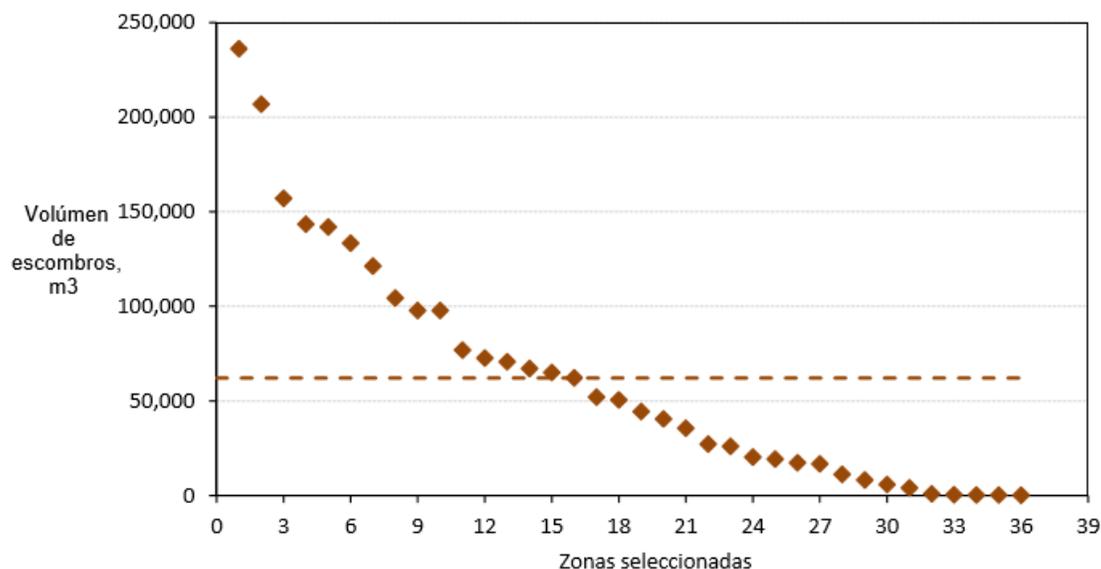


Figura 46. Distribución ordenada de volumen de escombros (m3) para zonas primarias

6.3 Mapas de distribución de Riesgo

En las páginas siguientes se presenta la distribución gráfica de los resultados de los análisis de riesgo probabilístico. A partir de la Figura 47 hasta la Figura 50 se presenta la distribución especial de daños estructurales/volumen de escombros, edificaciones calificadas en rojo, muertes y heridos, respectivamente. Como se discutió previamente, los valores están presentados para responder a los valores (previstos) de la media (prevista).

En las gráficas, la distribución por color indica la intensidad esperada de cada consecuencia. La información de estos mapas puede ser usada para identificar las zonas que son más susceptibles a pérdidas por sismo, para las cuales pueden priorizarse los recursos de acondicionamiento sísmico y preparación ante terremotos. En particular:

- La distribución de mortalidad en las zonas difiere significativamente entre escenarios sísmicos diurnos y nocturnos. Se atribuye esta diferencia principalmente a los trayectos de los ciudadanos hacia el trabajo desde sus viviendas y actividades transitorias durante el día. Como tal, es imperativo que ambos escenarios sean considerados en la planeación del riesgo.
- Un incremento en la exposición se evidencia en diferentes zonas dependiendo de los parámetros de resultado que se elijan. Sin embargo, ciertas zonas parecen ser vulnerables a múltiples riesgos. Estas zonas requieren de atención detallada cuando se planeen los programas de preparación y mitigación de riesgo.

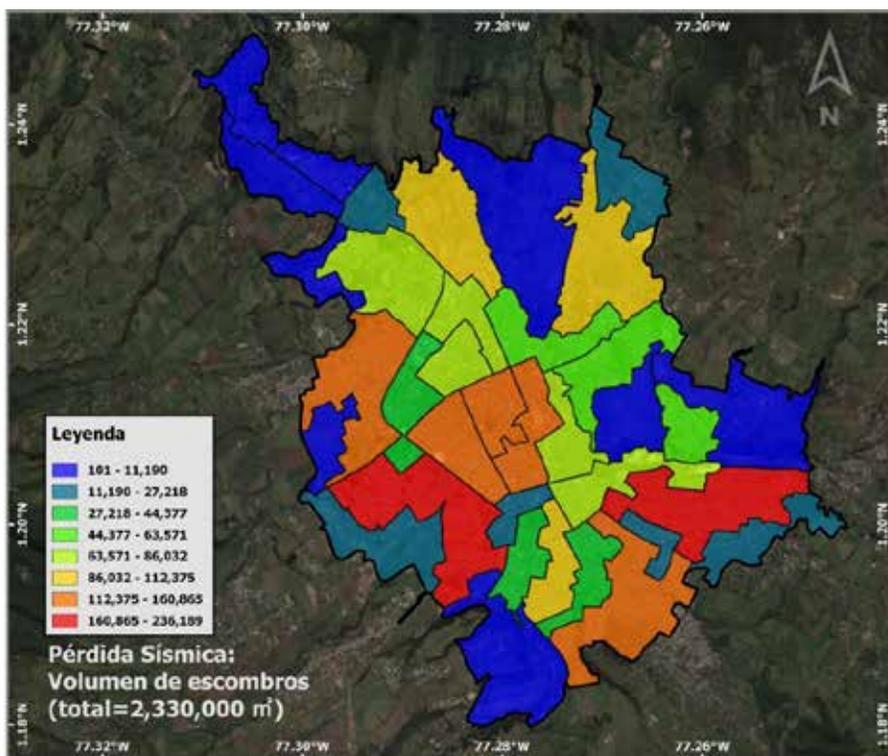
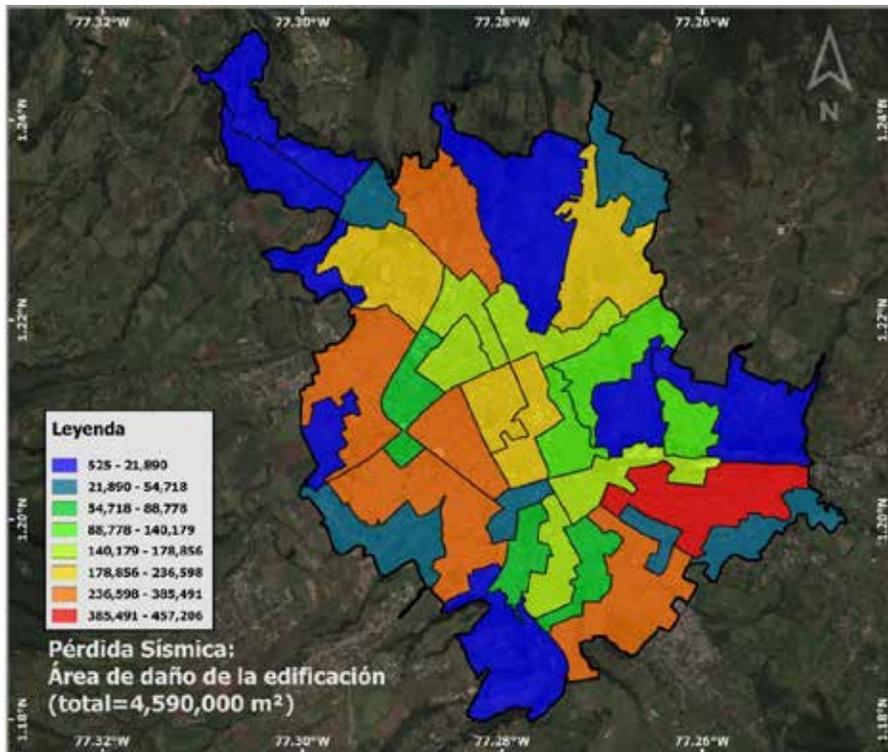


Figura 47. Distribución espacial del daño estructural

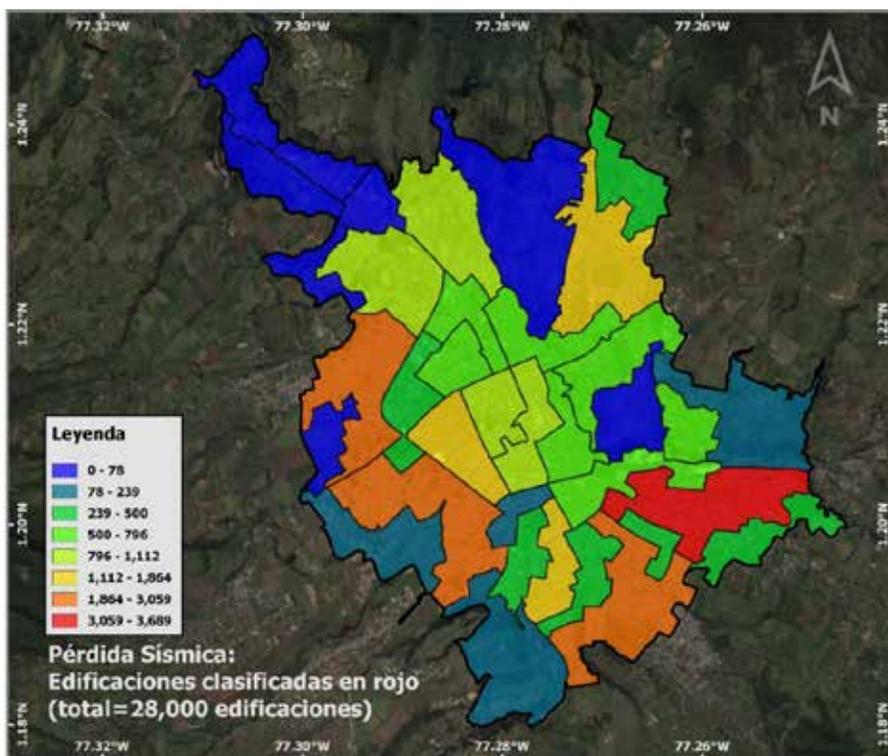
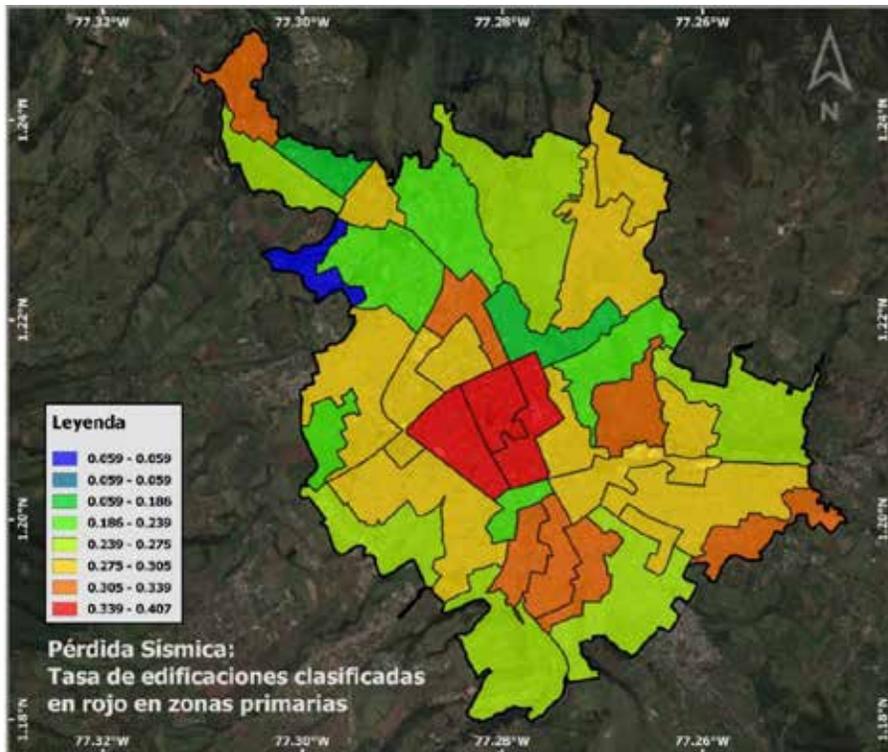


Figura 48. Distribución espacial de las edificaciones calificadas en rojo

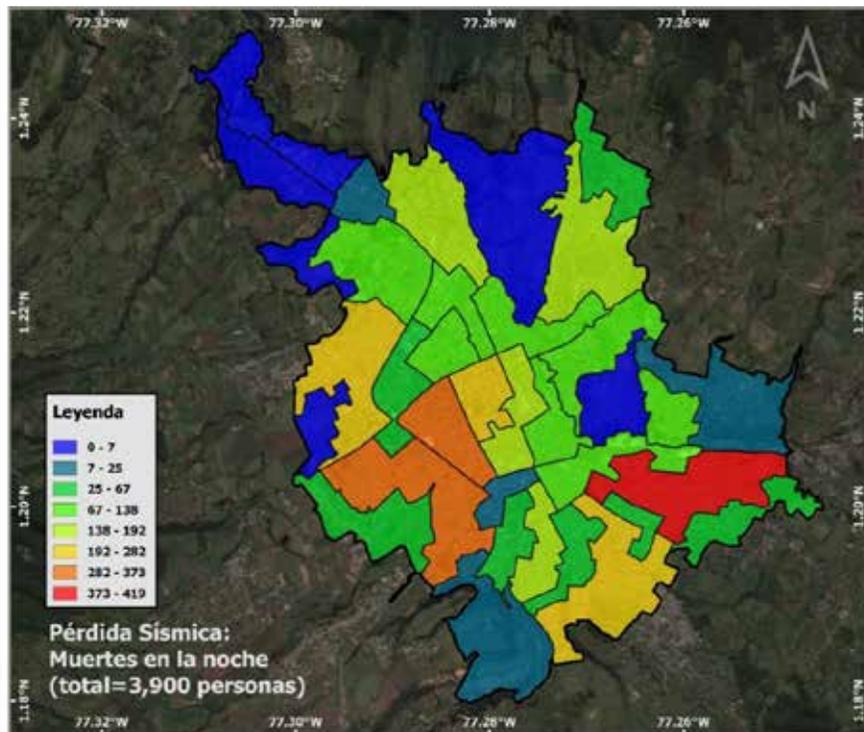
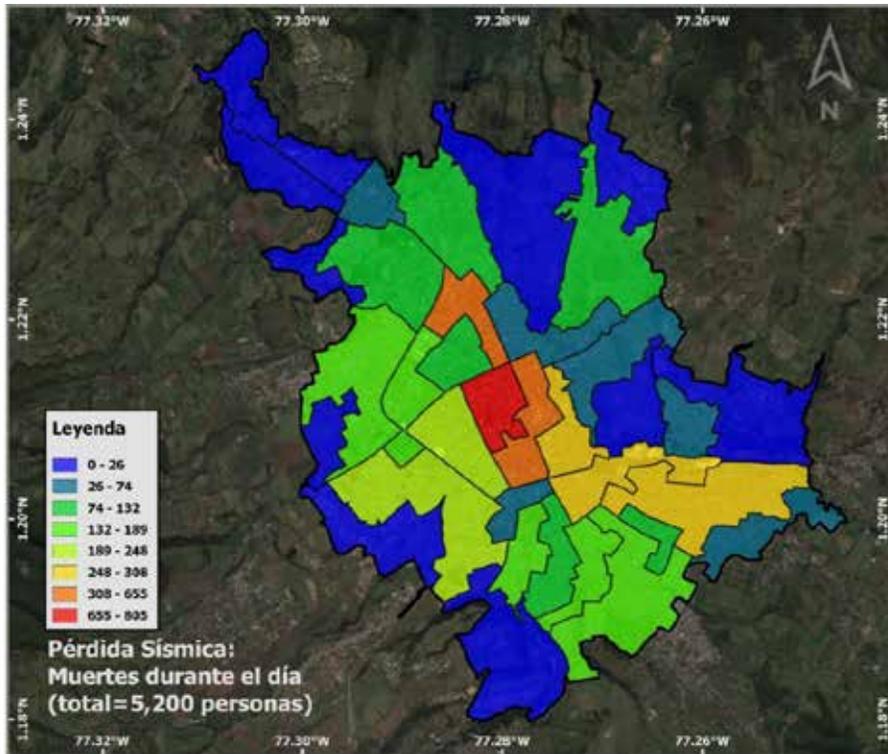


Figura 49. Distribución espacial de muertes

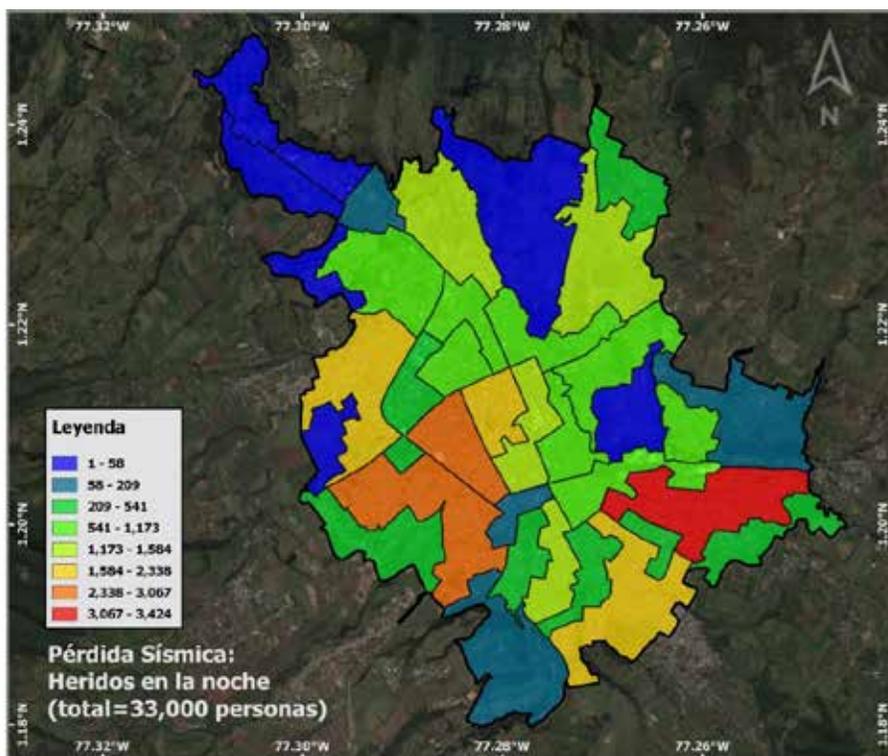
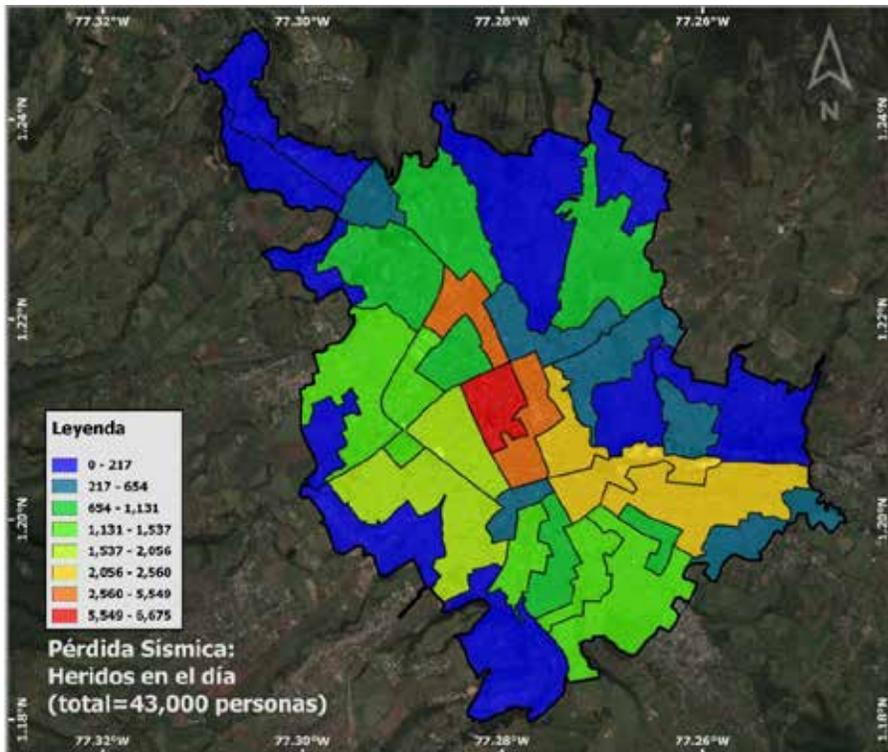


Figura 50. Distribución espacial de heridos

6.4 Resultados Acumulados

6.4.1 Generalidades

La Tabla 34 presenta los datos de exposición del área estudiada. Pasto alberga aproximadamente entre 457,000 habitantes (diurnos) y 376,000 habitantes (nocturnos) y tiene casi 97,200 edificaciones. Es importante mantener estos números en mente cuando se revise la información acumulada.

Tabla 34. Datos de exposición para Pasto

Edificaciones		Población	
No.	Área, m ²	Diurna	Nocturna
97,200	10,800,000	457,000	376,000

6.4.2 Daño físico y calificación de edificaciones

El daño físico anticipado para el área construida que es sujeto del diseño sísmico se presenta en la Tabla 35. Obsérvese que aproximadamente un 60% de las edificaciones serían calificadas como amarillas o rojas. El área de daño es casi el 42% del área total construida y el sismo podría resultar en cerca de 2,330,000 m³ de escombros.

Tabla 35. Valores previstos de pérdida estructural

Daño		Calificación		Calificación		Volumen, m ³
%	Área, m ²	%	No.	%	No.	
42%	4,590,000	31%	30,500	29%	28,000	2,330,000

6.4.3 Muertes y heridos

Las muertes y heridos anticipados en el diseño sísmico se encuentran listados en la Tabla 36. El área podría experimentar aproximadamente de 4,000 a 5,000 muertes y de 33,000 a 43,000 heridos, que representan cerca del 1% y 9% de la población de Pasto respectivamente.

Tabla 36. Valores previstos de muertes y heridos

	Mortalidad %	No. de	Heridos %	No. de
Día	1.1%	5,200	9.5%	43,000
Noche	1.0%	3,900	8.7%	33,000

6.4.4 Discusión

Los resultados de la simulación de riesgo sísmico para Pasto revelaron que se deben esperar tasas significativas de daño estructural y una relativamente alta tasa de mortalidad según el diseño sísmico. La evaluación también arrojó que algunas zonas son particularmente vulnerables a sufrir consecuencias adversas de este tipo de evento. Estos resultados muestran la necesidad de desarrollar un programa de preparación antes sismos que incluya la ubicación de recursos, acondicionamiento de edificaciones vulnerables, preparación y planeación ante sismos y desarrollo de una evaluación posterior al sismo y un programa de recuperación.

Cabe anotar que los resultados discutidos en este reporte se basan en un análisis probabilístico que usó tanto convenciones como criterios de ingeniería. Por otra parte, los resultados se obtuvieron de un escenario del sismo dado en el diseño sísmico. Finalmente, los resultados presentados son los valores de la media (promedio).

Dado que varias incertidumbres se consideraron en el análisis estocástico de riesgo, los resultados contienen esencialmente un cierto nivel de variación que proviene de la distribución probabilística. Por tanto, tales variaciones deberían ser consideradas para cuando se interpreten los resultados y se apliquen para una futura planeación.

7. CONCLUSIONES

Con base en la experiencia de sismos pasados y recientes en Centro y Sur América se ha evidenciado que el entorno edificado general es afectado considerablemente resultando en pérdidas humanas y causando daño físico que puede ser una porción significativa del PIB (Producto Interno Bruto) del país.

El algoritmo de evaluación de riesgo usó los siguientes parámetros como información de entrada: (1) diseño de amenaza sísmica; (2) información de exposición de toda la ciudad, incluyendo propiedades estructurales y número de ocupantes; (3) fragilidad de las edificaciones para las tipologías comunes de edificaciones y (4) funciones de resultado referente al número de muertes, heridos, daño estructural, volumen de escombros para el estado de daño de la edificación.

Al combinar los datos disponibles de clasificación de sitio y la aceleración en roca se desarrolló la superficie de aceleración para el diseño sísmico. Los parámetros del diseño sísmico para aceleración pico del suelo (PGA) se calcularon y fueron estimados en 0.33 g aproximadamente. Las inspecciones de campo de 2,084 edificaciones, (2% del inventario de edificaciones), imágenes satelitales, información del uso de tierras e información del censo se usaron para estimar los datos de exposición. Estos datos fueron usados para dividir las edificaciones en varios grupos de construcciones de tipo similar. Los parámetros de fragilidad de las edificaciones adecuados para las construcciones en Pasto fueron determinadas usando fuentes mundialmente reconocidas. Los parámetros para las funciones de consecuencia, basados en estándares mundiales y registros históricos, fueron modificados para los tipos de construcción que se encuentran en Pasto. La información de exposición a riesgo se presenta en la tabla 37.

Tabla 37. Área edificada y exposición de la población para Pasto

No. de	Area	Ocupantes	Ocupantes
97,200	10,800,000	457,000	376,000

Un análisis de riesgo probabilístico fue llevado a cabo usando la plataforma de cálculo OpenQuake para estimar los riesgos asociados. La información de las edificaciones individuales fue agregada para obtener los valores de respuesta esperados para cada zona individual y luego se sumó para Pasto. Los resultados acumulados básicos del análisis de riesgo sísmico se presentan en la Tabla 38.

Los resultados del análisis en la Tabla 38 muestran que:

- El número de edificaciones que se espera clasifique en calificación amarilla (daño moderado) o calificación roja (daño severo) se estima en alrededor de 58,000 estructuras o aproximadamente el 60% del inventario edificado.
- Dependiendo del momento en que el evento ocurra, se anticipan aproximadamente de 4,000 a 5,000 muertes (para una tasa estimada del 1%).
- Dependiendo del momento en que el evento ocurra, se anticipan aproximadamente de 33,000 a 43,000 heridos (para una tasa estimada del 9%).
- Un volumen de escombros generado de 2,330,000 m³ es significativo y debe ser considerado.

Tabla 38. Valores previstos de exposición ante riesgo sísmico para Pasto

Daño estructural m ² (%)	Muertes		Heridos		Calificación Inseguro		Volumen de Escombros, m ³
	Día, persona (%)	Noche, persona (%)	Día, persona (%)	Noche, persona (%)	Amarillo, no. (%)	Rojo, no. (%)	
4,590,000	5,200	3,900	43,000	33,000	30,500	28,000	2,330,000
(42%)	(1.1%)	(1.0%)	(9.5%)	(8.7%)	(31%)	(29%)	

A causa del gran número de edificaciones vulnerables, tales como mampostería no reforzada o estructuras antiguas no acondicionadas, se esperaba el daño físico alto y las altas tasas de mortalidad calculado. Esto evidencia la necesidad de desarrollar un programa de mitigación de riesgo. Como parte de dicho programa, se recomienda implementar las siguientes estrategias:

- Proveer un programa de fortalecimiento para estructuras concretas que son identificadas por tener el mayor riesgo a causa de su inherente vulnerabilidad estructural, densidad de ocupantes e importancia.
- Establecer un programa de evaluación de daño por amenaza sísmica. Es crítico capacitar y certificar ingenieros y establecer la logística. Tal programa mejorará la respuesta y esfuerzos de recuperación después de grandes sismos.
- Optimizar la distribución de la respuesta ante emergencias y recursos para recuperación, identificando las regiones más vulnerables.
- Establecer programas de comunicación de alcance público. Es de importancia crítica comunicar los resultados y las recomendaciones mencionadas anteriormente, La comunidad debe estar informada del riesgo sísmico y los métodos de reducción del riesgo.

Los resultados, hallazgos y conclusiones que se presentan en este estudio se basan en un análisis de riesgo sísmico derivado de referencias internacionalmente reconocidas y técnicas analíticas de última generación. Sin embargo, como en cualquier proyecto de ingeniería los métodos subyacentes y análisis se basan en ciertos supuestos y criterios de ingeniería. Adicionalmente, los resultados se basan en un escenario de intensidad sísmica diseñada dada y corresponden a los valores esperados o medias. Esto es, que los resultados presentan las consecuencias esperadas para un evento promedio de una gran muestra de eventos de intensidades similares. Como tal, los resultados en este reporte incluyen un cierto grado de incertidumbre (inherente a la evaluación de riesgo) y no deberían ser extrapolados directamente para un evento sísmico futuro. De la misma manera, los supuestos y variaciones no deberían ser tenidos en cuenta cuando se interpreten los resultados y se apliquen los resultados a planeaciones futuras.

8. REFERENCIAS

- Acevedo, A., et al. (2016), "Evaluation of the seismic risk of the unreinforced masonry building stock in Antioquia, Colombia." *Natural Hazards*, Springer, DOI 10.1007/s11069-016-2647-8.
- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2010). *ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2001a). *Hazus-MH 2.1, Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2001b). *Hazus-MH MR5, Advanced Engineering Building Module (AEBM), Technical and User's Manual*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- Global Earthquake Model Foundation (GEM) (2016). *The OpenQuake-engine User Manual*, Global Earthquake Model (GEM) Technical Report 2016-03.
- Global Earthquake Model Foundation (GEM) (2014). *User guide: Tool for spatial inventory data development*, Global Earthquake Model (GEM) Technical Report 2014-05.
- NSR-10 (2010). *Colombia regulations for seismic-resistant construction* (in Spanish). Ministry of Housing, City and Territory, Bogotá, Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), Cifuentes, H., and Sarabia, A. (2013). *Evaluation of the degree of damage in the city of San Juan de Pasto as a result of historical issues* (in Spanish). Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), Eraso, J. (2015). *Zonation by shear wave velocity to 30 m (V_s30) in the city of San Juan de Pasto* (in Spanish). Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
- Tibaldi, A., and Leon, J. (2000). "Morphometry of late Pleistocene-Holocene faulting and volcano tectonic relationship in the southern Andes of Colombia." *TECTONICS*, vol. 19, no. 2, pp. 358–377.
- U.S. Geological Survey (USGS), Jaiswal, K., Wald, D.J., and Hearne, M. (2009). *Estimating Casualties for Large Earthquakes Worldwide Using an Empirical Approach*, Open-File Report 2009-1136.
- U.S. Geological Survey (USGS), Jaiswal, K., and Wald, D.J. (2011). *Rapid Estimation of the Economic Consequences of Global Earthquakes*, Open-File Report 2011-1116.

Apéndice A: Datos Suplementarios

Descargue en este link:

http://miyamotointernational.com/wp-content/uploads/Pasto-Phase-I-Report_Appendix-A_-Spanish.pdf

Apéndice B Discusión de la evaluación de la información inspeccionada

B.1 Generalidades

Una consideración fundamental para la aplicación de las edificaciones muestreadas en Pasto es la idoneidad de extrapolar los resultados de los datos recolectados a la ciudad como un todo. Determinar esta aplicabilidad implica dos planteamientos:

- Uso de una muestra de tamaño adecuado
 - Uso de un grupo representativo de edificaciones

B.2 Análisis del tamaño de la muestra

En muestreo estadístico, se asume que la población (N) tiene una distribución normal. El margen de error (E) para un nivel de confianza dado puede ser calculado desde:

$$\text{Eq. B.1.} \quad E = \sqrt{\frac{(N-n)}{n(N-1)}} x$$

Donde x es calculado desde

$$\text{Eq. B.2.} \quad x = Z\left(\frac{\alpha}{2}\right) r(1 - r)$$

Donde $Z(\alpha/2)$ es el área bajo la curva de la distribución normal para una desviación estándar dada y es obtenida desde la distribución estándar normal para un intervalo de confianza dado. Por ejemplo, para un intervalo de confianza del 95% (que es área bajo el 97.5% resaltado, como lo muestra la Figura B.1, correspondiente a 1.96 desviaciones estándar).

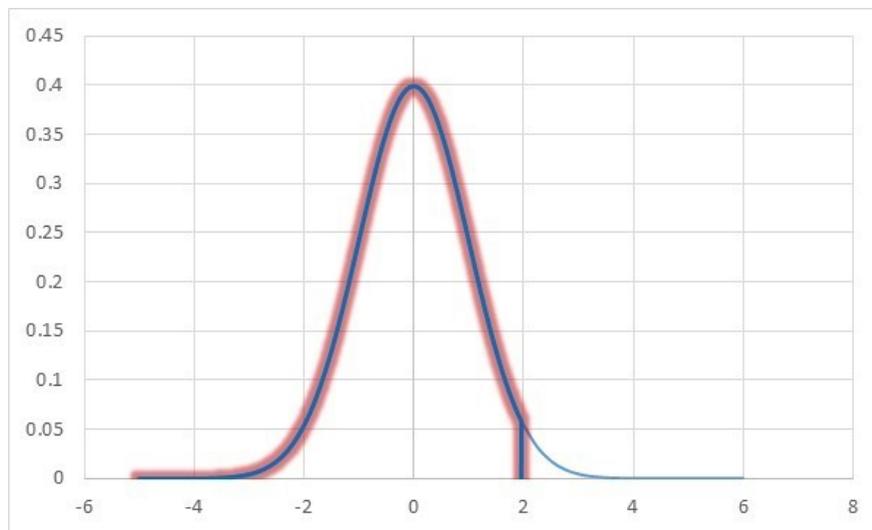


Figura B.1. Valor de $z(\alpha/2)$ para dos desviaciones estándar (intervalo de confianza de 95%)

r es la desviación estándar de la muestra, y como se puede ver en la Eq. B.2. resulta en el valor más grande para x por un valor de 0.5. Sustituir para $z(a/2)$ y r , x igual al 0.96% para un 95% de intervalo de confianza.

Como se plantea en la Tabla B.1, se inspeccionó aproximadamente el 2.1% de las edificaciones en las zonas primarias. Dada la gran cantidad de edificaciones en las zonas primarias, la suposición de la distribución normal para la población de las edificaciones se justifica. Para las zonas especiales, se inspeccionó un porcentaje considerablemente mayor de edificaciones debido a que el número de edificaciones en el grupo era pequeño. Considerando la similitud en la construcción para una ocupación determinada y ya que todas las diferentes ocupaciones fueron incluidas en la muestra, la distribución normal puede adoptarse para las zonas especiales.

Usando las edificaciones existentes y el tamaño de la muestra, el margen de error (E) para las zonas y la suma para un 95% de intervalo de confianza son computados desde la Eq. B.1. y se encuentran listadas en la Tabla B.1. Los márgenes de error son pequeños y por lo tanto indican que el tamaño de la muestra fue la adecuada para este estudio.

Tabla B.1. Evaluación del tamaño de la muestra

Zonas	Edificaciones (N)	Muestreadas (n)	Porcentaje	E
Primary	96,653	1,985	2.1%	2%
Special	583	99	17.0%	9%
Total	97,236	2,084	2.1%	2%

B.3 Representatividad de la muestra

Para el análisis discutido en este reporte para aplicar a Pasto como un todo, es importante para los datos de la muestra ser representativos del inventario de edificaciones en una ciudad, eso con el fin de que el muestreo sea objetivo. Como se mencionó anteriormente, se subdividió cuidadosamente la ciudad en varias zonas, y en cada zona, se inspeccionaron bloques de edificaciones que representan la distribución de las edificaciones en una zona determinada. Entonces las edificaciones inspeccionadas fueron representativas de cada uso de tierra, ocupación de la edificación, tipo de construcción y número de pisos. La Figura B.2 muestra bloques representativos de la inspección para las zonas primarias.

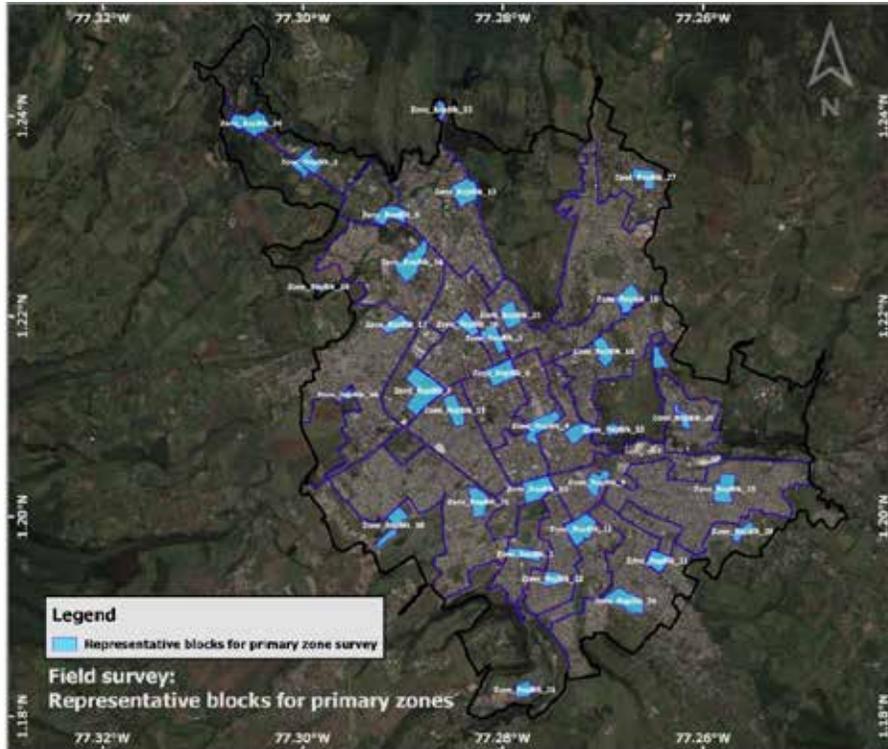


Figura B.2. Bloques representativos para zonas primarias

B.4 Evaluación de la población

La Tabla B.2 presenta la población calculada de Pasto con base en la información del censo de la ciudad, en los edificios del modelo de exposición usados para el análisis y en criterios de ingeniería. (Para los supuestos básicos, ver las notas para la Tabla B.2.) Los valores totales de la población comparados favorablemente con la información del censo que se encontraba disponible de la ciudad. Por tanto, se tiene una elevada confianza en que los resultados de programa de análisis de riesgo, que se discutieron en el reporte principal, serían representativos para Pasto.

Para calcular los registros en la Tabla B.2 y en las notas de pie de las tablas, se asumió lo siguiente:

- La población de Pasto partiendo de la información del censo y la proyección del censo es de 371,000. Este número se denominó como P.
- Se asume que el cociente de la población total durante el día y la noche es de 1.2. Como se muestra en la Figura B.1, este valor tiene estrecha concordancia con los datos del censo de ciudades en Estados Unidos con población similar.
- Para los no residentes, se asume un cociente de 2:1 para visitantes y trabajadores desde que Pasto cuenta con muchos colegios, hospitales, iglesias y centros comerciales.

Tabla B.2. Componentes de la población y proyección para Pasto

Situación de residencia	Situación Laboral	Diurno	Nocturno	Distribución de labores de la población para varios tipos de desarrollo
Residente de Pasto	Trabaja en Pasto	179,000‡	5,000§	Industrial, urbana, comercial, hospital grande y centro comercial grande
	Permanece pero no trabaja en Pasto	192,000**	366,000††	Todos excepto centros comerciales grandes
No residente de Pasto	Trabaja en Pasto	29,000‡‡	5,000§§	Industrial, urbana, comercial, hospital grande y centro comercial grande
	Visitante	57,000***	0†††	Todos excepto industrial y espacios abiertos
Población total		457,000	376,000	

‡ Con base en (cociente de población económicamente activa)*(tasa de empleo)*P = 54.8%*88%*371,000

§ Con base en $(1/2)*(5%)*(trabajos\ diurnos) = 1/2*5%*208,000$

** Desde 371,000–179,000

†† Desde 371,000–5,000

‡‡ Con base en $(1.2*376,000-(179,000+192,000))/(1+2)$

§§ Con base en $(1/2)*(5%)*(daytime\ workers) = 1/2*5%*208,000$

*** $2*29,000$

††† Se asume que no hay visitantes entre los no residentes de Pasto durante la noche

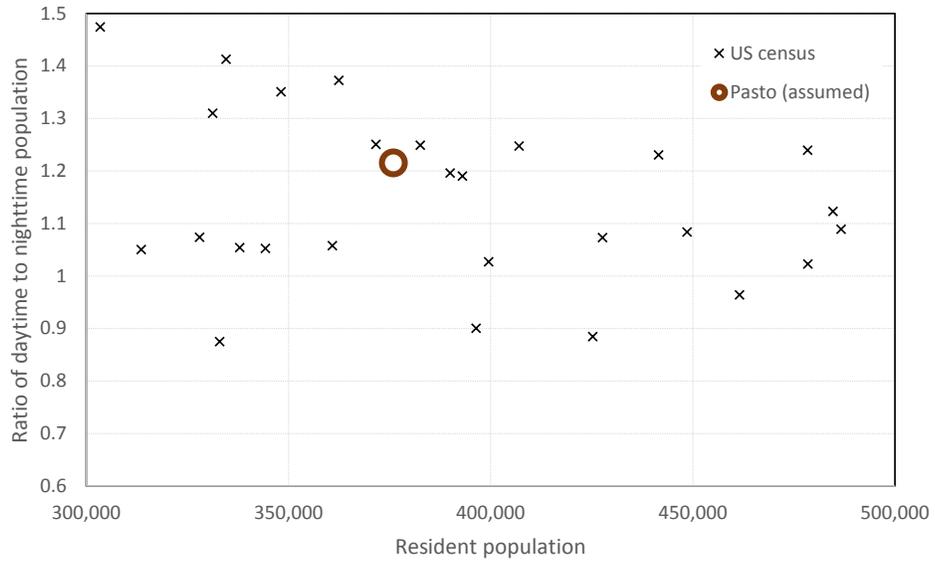


Figura B.3. Cociente de población desde el día hasta la noche para las ciudades seleccionadas en EEUU y los valores supuestos para Pasto



