



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Una metodología de evaluación del riesgo público por inundación por falla del sistema de alcantarillado pluvial - caso de la cuenca del río Salitre, Bogotá

Leila Constanza Hernández Rodríguez I.C.

Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2012

Una metodología de evaluación del riesgo público por inundación por falla del sistema de alcantarillado pluvial - caso de la cuenca del río Salitre, Bogotá

Leila Constanza Hernández Rodríguez I.C.

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

Carlos Eduardo Cubillos Peña I.C., M.Sc.

Línea de Investigación:

Hidrología y Meteorología

Hidrología Urbana

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos, GIREH

Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2012

A Sandy, quien desde el cielo me acompaña.

Agradecimientos

Agradezco especialmente a mis padres, Luis Enrique Hernández Castillo y María Antonia Rodríguez Robayo, porque su amor y apoyo siempre me han acompañado y me han impulsado a lograr propósitos y sueños. A mi hermanita, Ángela Sofía Hernández Rodríguez, de quién siempre he recibido compañía y alegría. A mi abuelita y familia. A Andrés Felipe Rojas Aguirre con quien comparto esperanzas y alegrías. Me enorgullece decirles que este logro también es de ustedes y que siempre estaré agradecida con Dios por darme la más bella familia.

A mi director de tesis y querido amigo, el profesor Carlos Eduardo Cubillos Peña, por sus valiosos consejos, sus acertadas correcciones y por las fructíferas reuniones de tesis. Gracias por fomentar en mí la investigación en esta temática y acompañarme activamente en cada paso del desarrollo de esta investigación.

A todos mis amigos del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, con quienes he aprendido a conocer los ríos colombianos en el desarrollo profesional de la ingeniería en Recursos Hidráulicos. A mis amigos del grupo GIREH, a quienes acudí en busca de ayuda para el desarrollo de mi tesis y dedicaron su tiempo y conocimientos para apoyarme. A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia por otorgarme durante dos semestres la beca por obtener el mejor promedio académico de la Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos.

Agradezco por su colaboración en la consecución de la información utilizada en la presente tesis a los ingenieros Juan Carlos Rodríguez, Daniel Rodríguez, Ivonne Navarro y Laura Corredor de la Dirección de Ingeniería Especializada de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB; a Jorge Holguín y Alejandro Montes de la Dirección de Red Troncal de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB; a Germán Barreto y Giovanni Almanza del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias - FOPAE; a Jose Guillermo Hernández y Ana Carolina Escobar del Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE; al profesor Mario Díaz-Granados y Juan Pablo Rodríguez de la Universidad de Los Andes y al profesor Pedro Avellaneda de la Universidad Nacional de Colombia por las valiosas orientaciones. A Hans Sánchez de la Universidad Politécnica de Cataluña BarcelonaTech por su colaboración con el software Iber.

Resumen

En esta tesis de investigación se propone una metodología para la evaluación del Riesgo Público por Inundación en Áreas Urbanas, denominada RPIU, a partir de la posibilidad de falla del sistema de alcantarillado pluvial. Se plantea una visión holística de la problemática y la aplicación de índices e indicadores ponderados dentro de un análisis multicriterio en el cual se identifican, a partir de la aplicación de escenarios probables de solicitaciones del sistema con base en la situación actual, aquellos sectores de mayor riesgo por inundación con relación a la perspectiva temporal de operatividad del alcantarillado pluvial. Asimismo, se estableció una escala de nivel de riesgo que establece no sólo un valor de afectación, sino las características más probables del nivel de riesgo público por inundación en el área urbana. La escala propuesta se denomina la “Escala de Hernández & Cubillos” de acuerdo con sus autores. La aplicación de la metodología RPIU en la subcuenca denominada “Salitre Bombeo” en Bogotá D.C., Colombia, mostró que para diversos escenarios de análisis, los encharcamientos producidos por la insuficiencia hidráulica y la falla estructural del sistema de alcantarillado establecen niveles de riesgo mayores en áreas en donde la vulnerabilidad social y física es alta.

Palabras clave: Riesgo de Inundaciones Urbanas, Sistema Público de Alcantarillado, Evaluación Multicriterio, Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible.

Abstract

In this thesis research, we propose a methodology for evaluating public Flood Risk in Urban Areas, called RPIU, from the possibility of failure of the storm sewer system. We propose a holistic view of the problem and the application of weighted indices and indicators within a multi-criteria analysis in which they identify, from the application of stresses likely scenarios of the system based on the current situation, those sectors most flood risk in relation to the time horizon of operation of the storm sewer. It was also established a scale of level of risk that provides not only a value of affectation, but also the likely characteristic the level of public risk level from flooding in urban areas. The proposed scale is called the "Scale of Hernandez & Cubillos", named after the authors. The methodology RPIU was applied to the “Salitre Bombeo” watershed, in Bogota, Colombia. The results showed that for various analysis scenarios, the waterlogging caused by hydraulic failure and structural failure of the sewerage system established major risk levels in areas where social and physical vulnerability is high.

Keywords: Urban Flood Risk, Public Sewer System, Multicriteria Evaluation, Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS).

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XV
Lista de tablas	XX
Lista de fotografías	XXIV
Lista de símbolos y abreviaturas	XXV
1 Introducción	27
1.1 Generalidades	27
1.2 Pregunta de investigación y justificación.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 General	4
1.3.2 Específicos.....	4
1.4 Estructura del documento	5
2 Metodología de la investigación	7
2.1 Enfoque metodológico	7
2.2 Etapas de la investigación	8
2.2.1 Recopilación de información	8
2.2.2 Planteamiento de la metodología de análisis	8
2.2.3 Formulación de escenarios de evaluación.....	9
2.2.4 Aplicación del modelo conceptual de análisis.....	10
2.2.5 Validación de los resultados del modelo de análisis	10
2.2.6 Conclusiones y recomendaciones	10
3 Marco normativo y conceptual.....	11
3.1 Marco normativo del riesgo público.....	11
3.2 Visión holística de la evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas.....	13
3.3 Factores de la evaluación del riesgo por inundación en áreas urbanas	16
3.3.1 Amenaza de inundación en áreas urbanas	16
3.3.2 Vulnerabilidad social	17
3.3.3 Vulnerabilidad física del área de estudio	18

3.3.4	Vulnerabilidad estructural y funcional asociada al sistema de alcantarillado pluvial.....	19
3.3.5	Resiliencia	21
3.3.6	Mitigación	21
3.4	Impactos de la urbanización en relación con el riesgo público por inundación.....	22
3.5	Consideraciones de diseño del alcantarillado pluvial	24
3.6	Mecanismos de falla generadores de inundación en áreas urbanas.....	26
3.7	Sistemas de alcantarillado en la ciudad de Bogotá D.C.....	29
3.8	Tipos de metodologías y modelos empleados en la evaluación del riesgo	32
3.9	Protocolo de modelación del riesgo público por inundación en áreas urbanas.....	34
4	Propuesta metodológica de evaluación del Riesgo Público por Inundación en Áreas Urbanas (RPIU)	37
4.1	Base metodológica del RPIU	37
4.2	Metodología del RPIU	39
4.2.1	Rango del RPIU	40
4.2.2	Formulación del RPIU	40
4.2.3	Ponderaciones del RPIU	41
4.2.4	Dominio del RPIU	42
4.3	Evaluación de la Amenaza (A)	42
4.3.1	Análisis de la amenaza por precipitación pluvial (A_P)	43
4.3.2	Análisis de la amenaza hidrodinámica (A_H)	47
4.3.3	Análisis de la amenaza de inundación en la llanura inundable (A_H) ..	55
4.3.4	Evaluación final de la amenaza (A)	56
4.4	Índices e indicadores de vulnerabilidad social (VS)	57
4.4.1	Índice demográfico (VS_D)	59
4.4.2	Índice de condiciones de vida (VS_CV)	61
4.4.3	Índice de exposición humana (VS_EH)	64
4.4.4	Evaluación general de la vulnerabilidad social (VS)	69
4.5	Índices e indicadores de vulnerabilidad física del área de estudio (VF)	69
4.5.1	Índice asociado al territorio (VF_T)	70
4.5.2	Índice asociado al uso del suelo (VF_US)	71
4.5.3	Índice de exposición de las edificaciones (VF_EE)	72
4.5.4	Evaluación final de la vulnerabilidad física del área de estudio (VF)	74
4.6	Índices e indicadores de vulnerabilidad funcional y estructural asociados al sistema de alcantarillado pluvial (VAP)	75
4.6.1	Índice del estado funcional u operacional del alcantarillado pluvial (VAP_EF)	77
4.6.2	Índice del estado estructural del alcantarillado pluvial (VAP_EE)	80
4.6.3	Evaluación final de la vulnerabilidad funcional y estructural del sistema de alcantarillado pluvial (VAP)	84
4.7	Índices e indicadores de resiliencia (Re)	85
4.7.1	Índice de disponibilidad de servicios de atención primaria (Re_SAP) ..	86
4.7.2	Índice de asentamientos precarios (Re_PAP)	86
4.7.3	Índice de capacidad de respuesta ante desastres repetitivos (Re_CDR) ..	88
4.7.4	Índice de transferencia y retención del riesgo financiero (Re_RF)	90
4.7.5	Evaluación final de la resiliencia (Re)	91
4.8	Índices e indicadores de mitigación (M)	92
4.8.1	Análisis beneficio-coste de la mitigación	92
4.8.2	Planes integrales de mitigación	93
4.8.3	Mitigación estimada de los SUDS	97

4.8.4	Evaluación final de la mitigación (M)	101
4.9	Evaluación del riesgo efectivo por inundación	102
4.9.1	Evaluación del riesgo a nivel mundial.....	102
4.9.2	Escala del riesgo público por inundación en áreas urbanas	103
4.10	Manejo de la información para la aplicación de la metodología RPIU	107
4.10.1	Información base requerida para la aplicación de la metodología RPIU.....	107
4.10.2	Metodología de manejo de la información geográfica implementada en la aplicación de la metodología RPIU	109
4.10.3	Limitaciones de la información empleada en la aplicación de la metodología RPIU	111
5	Escenarios de análisis	113
5.1	Escenario 1: Condición actual.....	113
5.2	Escenarios de condiciones futuras factibles.....	114
5.2.1	Escenario 2: Proyecciones a 2020	114
5.2.2	Escenario 3: Proyecciones a 2030	115
5.2.3	Escenario 4: Proyecciones a 2051	115
6	Caracterización de la subcuenca “Salitre Bombeo”, Bogotá D.C.....	117
6.1	Selección de la subcuenca de estudio	117
6.2	Localización de la subcuenca “Salitre Bombeo”	120
6.3	Recurso hídrico en la subcuenca “Salitre Bombeo”	122
6.4	Sistema de drenaje de la subcuenca “Salitre Bombeo”	129
6.4.1	Caracterización hidráulica de la subcuenca	131
6.4.2	Evaluación hidrodinámica de las áreas de posible encharcamiento en la subcuenca.....	139
6.5	Vulnerabilidad del sistema de alcantarillado de la subcuenca.....	140
6.5.1	Estado funcional u operacional del alcantarillado	140
6.5.2	Estado estructural del alcantarillado de la subcuenca	156
6.6	Vulnerabilidad social en la subcuenca “Salitre Bombeo”	161
6.6.1	Distribución territorial.....	161
6.6.2	Índice demográfico	162
6.6.3	Condiciones de vida de la población	166
6.6.4	Exposición humana a la amenaza de inundación	169
6.7	Vulnerabilidad física en la subcuenca “Salitre Bombeo”	173
6.7.1	Índice asociado al territorio	174
6.7.2	Índice asociado al uso del suelo.....	176
6.7.3	Índice asociado a la exposición de las edificaciones	177
6.8	Resiliencia en la subcuenca “Salitre Bombeo” ante eventos de inundación ..	182
6.9	Alternativas factibles de mitigación del riesgo potencial de inundación en la subcuenca “Salitre Bombeo”	185
7	Análisis de los resultados de la aplicación de la metodología RPIU para los escenarios planteados.....	187
7.1	Amenaza por inundación en la subcuenca “Salitre Bombeo”	187
7.2	Escenario 1: Condición actual.....	190
7.2.1	Nivel de vulnerabilidad social	190
7.2.2	Nivel de vulnerabilidad física.....	192
7.2.3	Perspectiva temporal de operación del sistema de alcantarillado troncal combinado.....	193
7.2.4	Nivel de vulnerabilidad total.....	196

7.2.5	Nivel de riesgo público por inundación – Condición actual.....	197
7.3	Escenario 2: Proyección a 2020	198
7.4	Escenario 3: Proyección a 2030	199
7.5	Escenario 4: Proyección a 2051	199
8	Validación mediante verificación de registros consolidados	201
9	Conclusiones y recomendaciones	203
9.1	Consideraciones básicas.....	203
9.2	Consideraciones y criterios que sustentan la formulación de la metodología RPIU 203	
9.3	Conclusiones acerca de la aplicación de la metodología RPIU en la subcuenca “Salitre Bombeo”	205
9.4	Recomendaciones.....	209
9.5	Recomendaciones acerca de los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología RPIU.....	210
A.	Anexo: Glosario	213
	Definiciones básicas de la temática del riesgo público	213
	Definiciones básicas relacionadas con los sistemas de alcantarillado.....	215
B.	Anexo: Mapa conceptual de la metodología RPIU	221
C.	Anexo: Descripción de la implementación del software Iber en la modelación hidrodinámica	223
D.	Anexo: Resultados de las simulaciones matemáticas realizadas con el software EPA SWMM y con Iber	229
E.	Anexo: Registro fotográfico inundaciones en la ciudad de Bogotá D.C	253
F.	Anexo: Mapas de aplicación de la metodología RPIU en la subcuenca “Salitre Bombeo”, Bogotá D.C.	255
	Bibliografía	259

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Proyección de población para Bogotá D.C. (EAAB, 2006).	1
Figura 1-2: Cobertura de alcantarillado pluvial en Bogotá D.C. (EAAB, 2006).	2
Figura 3-1: Modelo de articulación de los tres sistemas en torno a la Gestión Local del Riesgo (DPAE, 2009).	12
Figura 3-2: Mapa organizacional del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias, SDPAE (FOPAE, 2011).	12
Figura 3-3: Características del balance hídrico en una cuenca urbana. (Tucci, 2007).	22
Figura 3-4: Hidrograma unitario hipotético para un área urbana (Leopold, 1968).	24
Figura 3-5: Efecto de la urbanización en la inundación anual de un área de drenaje de 1 milla cuadrada (Leopold, 1968).	24
Figura 3-6: Denominación de los lechos de los ríos. Adaptado de Tucci (2007).	27
Figura 3-7: Ocupación de las terrazas de inundación. Tucci (2007).	29
Figura 3-8: Esquema de disposición de servicios públicos de acueducto y alcantarillado en un predio. (EAAB, 2006).	30
Figura 3-9. Protocolo de modelación según la visión clásica del riesgo. (FOPAE, 2009).	34
Figura 4-1. Niveles de agregación de la metodología RPIU.	39
Figura 4-2. Tabla de división de caudal EPA SWMM 5.0. EAAB & Consorcio Alcantarillado Ltda. (2011).	51
Figura 4-3. Gráfico para la obtención de niveles de severidad en inundación pluvial (Escuder et al, 2010).	57
Figura 4-4: Efecto de las antropobarreras en cauces ante eventos extremos, ERN-CAPRA (2009).	77
Figura 4-5: Entorno de la herramienta SIRA, EAAB (2011b).	81
Figura 4-6. Corrosión biogénica de una tubería de concreto en un sistema de alcantarillado residual domestico en Alemania, 15 años de servicio. (Steinzeug-Keramo, 2011).	84
Figura 4-7. Tren de SUDS. Adaptado de Maksimovic, 2008.	94
Figura 4-8. Concepto de gestión integrada del agua lluvia en áreas urbanizada. Adaptado de Maksimovic & Braga (1993).	96
Figura 4-9. Perfil del riesgo como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de la amenaza y su impacto sobre los elementos vulnerables.	103
Figura 6-1. Desastres ocurridos en Bogotá durante el período 1994-1998 (FOPAE, Página Web consultada el 7 de octubre de 2010, http://www.fopae.gov.co/).	118
Figura 6-2. Localización general de la subcuenca “Salitre Bombeo”, Bogotá D.C. Imagen Google Earth.	120

Figura 6-3. Localización general de la subcuenca “Salitre Bombeo” en relación con la malla vial. Adaptado de Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2000).	121
Figura 6-4. Subcuenca combinada “Salitre Bombeo” en relación con las subcuencas aledañas. Adaptado de EAAB (2011) y Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2000).	121
Figura 6-5. UGAs de la subcuenca “Salitre Bombeo” y localización de la estación pluviográfica Salitre Casa de Bombas (EAAB P-004) y demás mencionadas. Información de EAAB & INGETEC (2005).	122
Figura 6-6. Promedios mensuales de precipitación en la estación Casa de Bombas Salitre (EAAB P-004) para el periodo 1971-2000. Datos del software Tormenta, EAAB & INGETEC (2005).	123
Figura 6-7. Curva Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), estación Salitre Casa de Bombas (EAAB P-004) para el periodo 1981-2003. Elaborada con datos de EAAB & INGETEC (2005).	124
Figura 6-8. Mapas de isolíneas de intensidad (mm/h) para la ciudad de Bogotá D.C. Tomado de EAAB & IRH (1995).	125
Figura 6-9. Valores mensuales de precipitación máxima en 24 horas (mm) para la estación Casa de Bombas Salitre (EAAB P-004). Datos de EAAB & INGETEC (2005).	126
Figura 6-10. Curva masa evento de mayor precipitación acumulada (07/11/1988). Datos de EAAB & INGETEC (2005).	126
Figura 6-11. Curva masa evento de mayor duración (24/06/2000). Datos de EAAB & INGETEC (2005).	126
Figura 6-12. Histograma de frecuencia simple de duración de los eventos de precipitación registrados en la estación Salitre Casa de Bombas P-004 (1981-2003).	127
Figura 6-13. Hietograma de diseño, periodo de retorno 3 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.	127
Figura 6-14. Hietograma de diseño, periodo de retorno 5 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.	128
Figura 6-15. Hietograma de diseño, periodo de retorno 10 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.	128
Figura 6-16. Hietograma de diseño, periodo de retorno 25 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.	128
Figura 6-17. Hietograma de diseño, periodo de retorno 50 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.	129
Figura 6-18. Hietograma de diseño, periodo de retorno 100 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.	129
Figura 6-19. Red de alcantarillado combinado troncal y UGAs de la subcuenca “Salitre Bombeo”. Datos de EAAB & Consorcio Alcantarillado Ltda. (2011) y Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2000).	130
Figura 6-20. Mapa de profundidades en las áreas de encharcamiento en la subcuenca “Salitre Bombeo”	140
Figura 6-21. Configuración en planta de la Estación elevadora El Salitre y llegada de los interceptores Río Nuevo y Río Negro Bombeo. EAAB & INGEPAVI LTDA. (2011).	145
Figura 6-22. Reporte de la topología de la subcuenca “Salitre Bombeo” ingresada en el modelo EPA SWMM 5.0.	148

Figura 6-23. Entradas de caudal al modelo hidráulico de la subcuenca “Salitre Bombeo” en el modelo EPA SWMM 5.0.	149
Figura 6-24. Salidas de caudal del modelo hidráulico de la subcuenca “Salitre Bombeo” en el modelo EPA SWMM 5.0.	149
Figura 6-25. Conservación de la masa del modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.	150
Figura 6-26. Caudales totales de entrada y salida del modelo hidráulico con caudal combinado, TR 3 años, con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.	151
Figura 6-27. Capacidad de operación de la red troncal combinada de la cuenca “Salitre Bombeo” con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0, con caudales combinados TR 10 años.	151
Figura 6-28. Perfil del interceptor Río Nuevo, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.	152
Figura 6-29. Perfil del interceptor Salitre Bombeo, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.	153
Figura 6-30. Perfil del interceptor Izquierdo Salitre, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.	153
Figura 6-31. Perfil del interceptor Río Negro Bombeo, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.	154
Figura 6-32. Perfil del interceptor Izquierdo Río Negro, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.	155
Figura 6-33. Material de los conductos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.	157
Figura 6-34. Material de los pozos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.	157
Figura 6-35. Fecha de instalación de los conductos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.	158
Figura 6-36. Fecha de instalación de los pozos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.	159
Figura 6-37. Vida útil remanente teórica de los conductos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.	160
Figura 6-38. Vida útil remanente teórica de los pozos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.	160
Figura 6-39. Proyecciones de población total por UPZ (2005-2051).....	162
Figura 6-40: Manzanas que contienen S&E en la subcuenca “Salitre Bombeo”.	165
Figura 6-41. Número de manzanas en las UPZ en las que se encuentra contenida la subcuenca “Salitre Bombeo” en relación con la estratificación. DANE (2005).	168
Figura 6-42. Distribución de manzanas en la subcuenca “Salitre Bombeo” en relación con su estratificación. DANE (2005).	169
Figura 6-43. Actividad humana predominante en las manzanas en la subcuenca “Salitre Bombeo” en relación con el uso del suelo.	170
Figura 6-44. Exposición humana en relación con el nivel del agua de la inundación en las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo”.....	171
Figura 6-45. Exposición humana en relación con la duración de la inundación en las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo”.....	172

Figura 6-46. Exposición humana en relación con la velocidad de la inundación en las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo”	173
Figura 6-47. Modelo de elevación digital corregido de 5m para la ciudad de Bogotá en el sector de la subcuenca “Salitre Bombeo”.	176
Figura 6-48. Modelo de elevación digital generado de 0.1m entre valores de elevación para la subcuenca “Salitre Bombeo”.	176
Figura 6-49. Manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” en relación con su porcentaje de impermeabilización.	177
Figura 6-50. Calidad estructural de las edificaciones en función del estrato socioeconómico de la manzana. DANE (2005).	178
Figura 6-51. Función de vulnerabilidad física para edificaciones de mampostería en diagrama flexible de dos pisos. ERN (2010).	179
Figura 6-52. Función de vulnerabilidad física para edificaciones de mampostería en diagrama flexible de tres o más pisos. ERN (2010).	180
Figura 6-53. Exposición de las edificaciones al aumento del nivel del agua de inundación en la subcuenca “Salitre Bombeo”.	181
Figura 6-54. Exposición de las edificaciones al aumento del nivel del agua de inundación en la subcuenca “Salitre Bombeo”.	181
Figura 6-55. Localización de centros de salud, atención de emergencias y defensa en la subcuenca “Salitre Bombeo”.	183
Figura 6-56. Curva de transferencia del riesgo. Cardona (2007).	184
Figura 7-1. Mapa de amenaza por encharcamientos en la subcuenca “Salitre Bombeo”.	188
Figura 7-2. Mapa de amenaza por encharcamientos para cada manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo”.	190
Figura 7-3. Vulnerabilidad social por manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo” para las condiciones actuales.	191
Figura 7-4. Vulnerabilidad física por manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo” para las condiciones actuales.	193
Figura 7-5. Vulnerabilidad funcional y estructural de la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.	194
Figura 7-6. Vulnerabilidad total por manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo” para las condiciones actuales.	196
Figura 7-7. Riesgo potencial de encharcamiento o inundación por manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo” para las condiciones actuales.	197
Figura 8-1. Reportes de eventos de tipo aluvial en la subcuenca “Salitre Bombeo”. FOPAE (2011).	201
Figura 8-2. Superposición de reportes FOPAE con el mapa de amenaza por manzana determinada con la metodología RPIU.	202

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Sistema de alcantarillado sanitario y pluvial de Bogotá. (EAAB, 2006).	31
Tabla 3-2: Tipos de estudios para análisis / evaluación de riesgos. (FOPAE, 2009).	33
Tabla 3-3: Técnicas de evaluación del riesgo. (FOPAE, 2009).	34
Tabla 4-1: Relaciones hidráulicas para tuberías circulares. EAAB & Consorcio Alcantarillado Ltda. (2011).	53
Tabla 4-2: Coeficiente de descarga para orificios de pared gruesa. Sotelo, 1997.	54
Tabla 4-3. Escala de amenaza desarrollada para la metodología RPIU a partir de la severidad de la inundación desarrollada en el proyecto SUFRI (Escuder et al, 2010).	56
Tabla 4-4: Intervalos de valoración del Coeficiente de Gini, SHD (2005)	64
Tabla 4-5: Umbrales de normalización de la profundidad de la inundación, adaptado de Zonensein et ál (2008)	65
Tabla 4-6: Umbrales de normalización del uso del suelo en Bogotá, AMB (2000,2003, 2004a).....	67
Tabla 4-7: Efectos de la velocidad de la lámina de agua en la planicie de inundación	69
Tabla 4-8: Factores de análisis del censo de Estratificación Bogotá D.C. DANE (2004) .	73
Tabla 4-9: Identificación y aspectos a evaluar en las fallas del sistema de alcantarillado pluvial. Adaptado de DPAE (2009).....	76
Tabla 4-10: Identificación de fallas, daños y efectos en el sistema de alcantarillado pluvial. Adaptado de DPAE (2009).....	76
Tabla 4-11: Vida útil estimada de elementos construidos en materiales presentes en alcantarillados.	82
Tabla 4-12. Comparación de los SUDS frente a los sistemas convencionales de drenaje. Adaptado de Momparler & Andrés-Doménech (2007).....	97
Tabla 4-13. Comparación entre sistemas factibles de utilización en el “Tren de acciones mitigadoras de inundaciones en áreas urbanas”. Adaptado de UNH (2007).	98
Tabla 4-14. Hidrogramas de caudal en la implementación de SUDS. Adaptado de UNH (2007).	99
Tabla 4-15. Matriz de Riesgo Potencial de Inundación en Áreas Urbanas del RPIU	105
Tabla 4-16. Matriz de Riesgo Efectivo ante la implementación de medidas mitigadoras	105
Tabla 4-17. Escala de valoración del Riesgo Público por Inundación, propuesta por Hernández & Cubillos.	106
Tabla 5-1. Resumen de escenarios propuestos	116
Tabla 6-1. Comparación entre posibles cuencas de aplicación de la metodología RPIU	119

Tabla 6-2. Relaciones Intensidad - Duración - Frecuencia de la estación Salitre Casa de Bombas (EAAB P-004) para el periodo 1981-2003. EAAB & INGETEC (2005).	124
Tabla 6-3. Consumos o Dotaciones Medias Residenciales promedio para Bogotá D.C., CIC TEA (1996) en EAAB & ECI (2010).	132
Tabla 6-4. Distribución de la demanda promedio según uso del suelo para el área urbana de Bogotá D.C., CIC TEA (1996) en EAAB & ECI (2010).	132
Tabla 6-5. Composición de consumos para diferentes usos del suelo diferentes al residencial, CIC TEA (1996) en EAAB & ECI (2010).	133
Tabla 6-6. Población de saturación para la ciudad de Bogotá D.C., CIC TEA (1996) en EAAB & ECI (2010).	133
Tabla 6-7. Caudal residual aportado por las UGAs de la subcuenca "Salitre Bombeo". Adaptado de EAAB & ECI (2010).	134
Tabla 6-8: Primer grupo de parámetros a calibrar para el modelo EPA SWMM (EAAB & HMV, 2003).	135
Tabla 6-9: Segundo grupo de parámetros a calibrar para el modelo EPA SWMM (EAAB & HMV, 2003).	136
Tabla 6-10. Caudal pluvial aportado por las UGAs de la subcuenca "Salitre Bombeo". Datos de EAAB & HMV (2003).	138
Tabla 6-11. Parámetros de la curva IDF para calcular la intensidad media para las UGAs en la subcuenca "Salitre Bombeo". Datos de EAAB & HMV (2003).	138
Tabla 6-12. Distribución territorial de la subcuenca combinada "Salitre Bombeo"	161
Tabla 6-13. Proyecciones de población por grupos etarios (2005-2051)	163
Tabla 6-14. Densidad Poblacional Total en las UPZ de la subcuenca "Salitre Bombeo" (Personas/Ha).	164
Tabla 6-15. Índice de dependencia demográfica para la subcuenca "Salitre Bombeo" (Adimensional)	164
Tabla 6-16. Densidad de establecimientos LEA en las UPZ de la subcuenca "Salitre Bombeo"	165
Tabla 6-17. Índice de Calidad de Vida por localidades en "Salitre Bombeo", DANE (2007).	166
Tabla 6-18. Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas hogares, DANE (2007).	167
Tabla 6-19. Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas personas, DANE (2007).	167
Tabla 6-20. Coeficiente de Gini, DANE (2007).	167
Tabla 6-21: Centros de atención en salud en la subcuenca "Salitre Bombeo"	182
Tabla 7-1. Manzanas de la subcuenca "Salitre Bombeo" con los mayores valores de vulnerabilidad social para los escenarios de análisis.	192
Tabla 7-2. Manzanas de la subcuenca "Salitre Bombeo" con los mayores valores de vulnerabilidad social para la condición actual.	193
Tabla 7-3. Tramos de tubería de la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca "Salitre Bombeo" con menor perspectiva temporal de operación.	195
Tabla 7-4. Tuberías de la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca "Salitre Bombeo" con fecha de instalación indeterminada y trabajando a presión.	195
Tabla 7-5. Pozos de la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca "Salitre Bombeo" con menor perspectiva temporal de operación.	196

Tabla 7-6. Manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” con los mayores valores de vulnerabilidad total para la condición actual y escenarios futuros.....	197
Tabla 7-7. Manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” con los mayores valores de riesgo potencial para la condición actual y escenarios futuros.	198

Lista de fotografías

Fotografía 6-1. Canal Salitre en la confluencia con el canal río Negro y el alivio de la Carrera 68. Fotografía 19/10/2011. EAAB.....	141
Fotografía 6-2. Canal Salitre en la confluencia con el canal Río Negro y el alivio de la Carrera 68. Fotografía 19/10/2011. EAAB.....	142
Fotografía 6-3. Alivio canal Salitre con Carrera 68. Recorrido de campo 11/02/2012....	142
Fotografía 6-4. Soluciones provisionales al reflujo del alivio en el canal Salitre con Carrera 68. Recorrido de campo 11/02/2012.	143
Fotografía 6-5. Acciones de limpieza en el canal de alivio hacia el canal Salitre con Carrera 68. Visita 13/03/2012.	143
Fotografía 6-6. Vista del exterior de la Planta elevadora Salitre. Recorrido de campo 11/02/2012.....	144
Fotografía 6-7. Vista del interior de la Planta elevadora Salitre. EAAB & INGEPAVI LTDA. (2011).	145
Fotografía 6-8. Disposición de residuos sólidos en vía pública, UPZ Las Ferias. Recorrido de campo 11/02/2012.	146
Fotografía 6-9. Acumulación de lodos y residuos sólidos en el canal Salitre. Recorrido de campo 11/02/2012.	147
Fotografía 6-10. Residuos sólidos remanentes de construcción en la confluencia del canal río Negro con el canal Salitre. Recorrido de campo 11/02/2012.	147

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\iint dx dy$
D	Diámetro de un conducto	m	
L	Longitud de un conducto	m	DF
t	Tiempo	s	DF
V	Volumen	m^3	$\int dr^3$
$\vec{u}$	Velocidad media del flujo	$\frac{m}{s}$	$\frac{dr}{dt}, r \frac{dv}{dt}, \frac{dz}{dt}$
Q	Caudal	$\frac{m^3}{s}$	$\phi = \iint_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$

Abreviatura	Término
CAR	Corporación Autónoma Regional (Colombia)
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social (Colombia)
CREPAD	Comité Regional para la Prevención y Atención de Desastres (Colombia)
DPAE	Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (Colombia)
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (Colombia)
EPA	Environmental Protection Agency (EE. UU.)
FOPAE	Fondo de prevención y atención de emergencias de Bogotá. (Colombia)
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Colombia)
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Colombia)
PREDECAN	Prevención de Desastres en la Comunidad Andina.
SSPD	Superintendencia de Servicios Público Domiciliarios (Colombia)
SUDS	Sustainable Urban Drainage Systems, Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible.

1 Introducción

1.1 Generalidades

En años recientes los encharcamientos y las inundaciones urbanas que han ocurrido en Bogotá D.C., capital de la república de Colombia, han ido en aumento en diversos sectores de la ciudad. En algunos puntos identificados como críticos (DPAE, 2010), esta situación ha pasado de considerarse como una experiencia esporádica a una situación que se presenta recurrentemente, afectando a las comunidades quienes ven en peligro tanto sus bienes materiales como sus vidas (ver el Anexo: Mapa conceptual de la metodología

RPIU

Anexo:).

En la temporada de lluvias de 2008 más de 1.2 millones de colombianos (6% de los suscriptores de alcantarillado en Colombia), vieron afectadas sus viviendas y tuvieron dificultad con el drenaje de las aguas residuales y pluviales por medio de los sistemas de alcantarillado, producto de las inundaciones registradas en las áreas urbanas. El costo estimado de las pérdidas asociadas con los eventos climáticos 2007-2008 en Colombia, alcanzó un valor de \$14.8 mil millones de pesos (SSPD, 2009).

En cuanto al sistema de alcantarillado de aguas pluviales y sanitarias urbanas, en el país se ha experimentado un retraso en cobertura en comparación con los índices de la red de abastecimiento de agua. Esta situación es un común denominador en las poblaciones colombianas, en donde la comunidad percibe como prioridad el abastecimiento y presta menor atención al sistema de alcantarillado, el cual, en múltiples ocasiones no es estimado como un servicio básico esencial, cobrando importancia sólo cuando afecta la salud de las personas, genera desplazamientos, emergencias sanitarias, inundaciones, o impacta de manera grave los recursos hídricos y en general al medio ambiente (SSPD, 2009).

Para una ciudad en constante crecimiento como lo es Bogotá D.C., la ampliación de la cobertura y el mantenimiento de las redes e infraestructura de los sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario, han sido identificadas en las últimas décadas como una de las prioridades a tener en cuenta por la empresa prestadora del servicio. En este aspecto, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB, ha actualizado reiteradamente el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, con el fin de establecer los puntos críticos en los servicios públicos prestados por la empresa, y desarrollar estrategias que permitan llevar a cabo las metas de cobertura, calidad y servicio (EAAB, 2006).

La dinámica de crecimiento poblacional de la ciudad, como se observa en la Figura 1-1, exige una cobertura cada vez mayor de las redes de alcantarillado pluvial. En el panorama del año 2007, Figura 1-2, la EAAB mostraba una cobertura del 95.5% en el alcantarillado pluvial de la ciudad, en tanto que para el año 2008, alcanzó el 97.8%, lo cual superó lo proyectado para ese mismo año por esta entidad (EAAB, 2006). Es de destacar que estos porcentajes de cobertura de redes incluyen las redes de alcantarillado combinado.

Figura 1-1: Proyección de población para Bogotá D.C. (EAAB, 2006).

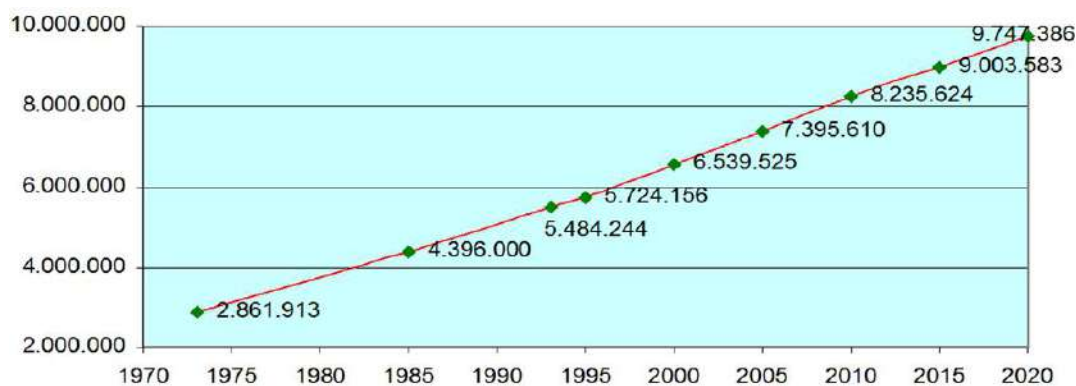
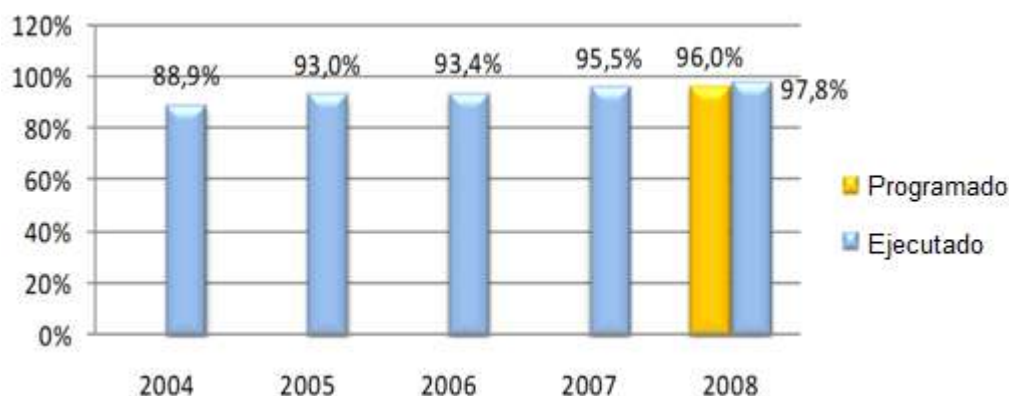


Figura 1-2: Cobertura de alcantarillado pluvial en Bogotá D.C. (EAAB, 2006).



La ejecución de obras y el aumento de la cobertura del alcantarillado pluvial requieren una constante inversión por parte de la empresa prestadora del servicio. Dentro del plan de inversiones la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, dispuesto por el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB, 2006), se establece que debido a que todos los proyectos de inversión no se pueden realizar al mismo tiempo (por restricciones en recursos financieros, capacidad de ejecución y aspectos técnicos de los proyectos), se requiere establecer criterios de priorización para mejorar la eficiencia en la ejecución de las obras y proyectos.

Las prioridades del plan de inversión del Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB, 2006), son:

- Proyectos en el marco de acciones judiciales
- Proyectos que se encuentran en ejecución (contratados)
- Redes locales de acueducto y alcantarillado
- Rehabilitación de infraestructura prioritaria
- Interceptores de aguas residuales
- Canales, colectores y adecuación de quebradas
- Adecuación de humedales
- Rehabilitación de infraestructura no prioritaria

Dentro de estas actividades se destaca no solo la instalación de nuevas redes de alcantarillado, sino la rehabilitación de redes que dentro de un futuro próximo pueden llegar a presentar obsolescencia o falla por múltiples factores. No obstante sin una óptima planificación, esta tarea puede convertirse en un ideal titánico para una ciudad compleja en la que, es necesario además, considerar los nuevos desafíos que conlleva el cambio climático.

En este sentido la DPAE ha venido alertando a las empresas relacionadas con los servicios públicos de la ciudad para que desarrollen y orienten acciones para la gestión del riesgo público definido por el Plan Distrital de Prevención y Atención de Emergencias para Bogotá, PDPAE, dentro de lo cual ya se ha realizado un primer estudio que recopila el marco metodológico para el conjunto de riesgos públicos de origen socio natural o antrópico no intencional que afectan las redes de éstos servicios (FOPAE, 2009). No obstante, dicho estudio concluyó que en su tiempo no se contaba con metodologías adecuadas para la evaluación de riesgo público en redes de servicios públicos.

Para llegar a implementar estrategias de gestión del riesgo en redes de servicios públicos, es necesario ser consecuentes con un proceso investigativo que permita desarrollar metodologías y modelos de evaluación que se apliquen al contexto colombiano, teniendo en cuenta sus particularidades. Por medio de la presente tesis de investigación se desea llegar a dar un primer paso para la inclusión del tema del riesgo público por inundación en áreas urbanas, considerando específicamente el caso de las redes de alcantarillado pluvial.

1.2 Pregunta de investigación y justificación

A pesar de los esfuerzos encaminados a drenar óptimamente la ciudad, existen factores inmersos en el contexto urbano los cuales se combinan para generar el riesgo público por inundación, por lo cual se requiere plantear la pregunta de ¿cuál es la perspectiva temporal de operatividad del sistema de alcantarillado pluvial?

Es un hecho que el crecimiento de la ciudad ha incrementando las áreas impermeables, produciendo mayores volúmenes de escorrentía, los cuales no son apropiadamente evacuados en algunos tramos del sistema de alcantarillado pluvial actual. Adicionalmente, la combinación de las aguas de escorrentía con las aguas sanitarias en un sistema combinado, dificulta el manejo del agua residual tanto en cuestiones de cantidad como de calidad. Asimismo, se han ocupado las rondas hidráulicas de los canales abiertos y ríos que hacen parte del sistema de alcantarillado urbano, generando condiciones de vulnerabilidad a la población que allí habita. Por consiguiente, se requiere que las inversiones para la solución de esta problemática sean priorizadas, tanto por factores económicos, como por factores técnicos y sociales. Por tanto la ciudad requiere:

- Establecer una herramienta de gestión y decisión
- Identificar y verificar zonas susceptibles a la inundación, para actuar sobre la reducción del riesgo público

- Identificar y jerarquizar las inversiones necesarias

En efecto, actualmente la ciudad no cuenta con una herramienta que le permita cuantificar el riesgo público por inundación desde una visión holística de la problemática, razón por la cual en esta investigación se propone, en primer lugar, la concepción de una metodología que permita determinar el riesgo público por inundación en áreas urbanas. Adicionalmente, se aplica la metodología desarrollada en la subcuenca “Salitre Bombeo”, una de las subcuencas combinadas de la cuenca del río Salitre, a manera de ejemplo y validación de la metodología, con el objeto de evaluar el riesgo público por inundación y la perspectiva temporal de operatividad de su red principal del alcantarillado.

Se busca que la metodología conceptual expuesta en el presente documento sea un aporte efectivo a las herramientas y estudios con que cuentan las empresas públicas y privadas a cargo del alcantarillado de la ciudad. Asimismo, se espera que esta metodología sea aplicada posteriormente a las demás cuencas de la ciudad.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Desarrollar una metodología conceptual que permita establecer el riesgo público por inundación en áreas urbanas, considerando las condiciones físicas y operativas del alcantarillado pluvial, las condiciones sociales y económicas de la población, el contexto físico del territorio en que se desarrolla el riesgo, y los demás factores que se presentan en el análisis del riesgo holístico por inundación. Posteriormente, aplicar la metodología propuesta en el análisis de escenarios posibles de solicitudes del sistema, para establecer el riesgo público y la perspectiva temporal de operatividad del sistema de alcantarillado pluvial en la subcuenca denominada “Salitre Bombeo” que hace parte de la subcuenca Salitre de la cuenca del río Bogotá. A partir de información de campo sobre algunos eventos de inundación registrados, se pretende evaluar la bondad de la metodología propuesta, a manera de estudio de caso.

1.3.2 Específicos

- Conceptualizar la relación entre la hidrología, el sistema de alcantarillado pluvial y la afectación resultante de la inundación por falla del sistema de alcantarillado pluvial, en el ámbito de la amenaza de la falla funcional y física del sistema, y de la vulnerabilidad del entorno social y económico urbano por inundación en áreas urbanas.
- Definir una estrategia de cálculo hidrológico e hidráulico para establecer la respuesta del sistema ante escenarios factibles de evaluación que permitan simular condiciones climatológicas, de uso del suelo, de crecimiento poblacional, de deterioro de la red, entre otros factores que inciden en el sistema de drenaje

pluvial, con el fin de evaluar el desempeño del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”, Bogotá D.C.

- Validar los resultados de amenaza por inundación determinados con la metodología propuesta, con respecto a la información disponible en puntos críticos de la cuenca de estudio, verificados y georreferenciados.

1.4 Estructura del documento

En el presente documento el lector podrá encontrar en el Capítulo 2 la metodología de la investigación, la cual se compone del enfoque metodológico y de las actividades que se siguieron para cumplir con los objetivos propuestos.

Posteriormente, en el Capítulo 3 se incluye la revisión del marco normativo y conceptual del riesgo público que se aplica en Bogotá D.C. como fundamento, para establecer la visión holística del riesgo público a desarrollar. Dentro de este capítulo es de destacar la forma en que la visión tradicional del riesgo es puesta en discusión y cómo se incursiona con una propuesta de visión holística del riesgo, lo cual se presenta en el numeral 3.2. Partiendo de los objetivos específicos previamente establecidos, se define el tipo de metodología y las técnicas de análisis para cada una de las fases de la evaluación, lo cual se encuentra contenido en el numeral 3.8.

En el Capítulo 4 se presenta la metodología propuesta para la evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas. Para la conformación de la metodología se realizó una exhaustiva investigación de los factores que deberían ser incluidos, considerando una visión holística del riesgo, y se establecieron las técnicas de evaluación que se consideraron más convenientes para cada uno de los factores a involucrar para, posteriormente, establecer los índices de valoración de la evaluación, los cuales se muestran en el numeral 4.1.

En el Capítulo 5 se plantea según la disponibilidad de información los escenarios de análisis a desarrollar en la aplicación de la metodología. Posteriormente, la metodología fue aplicada en la subcuenca “Salitre Bombeo”, parte de la cuenca del río Salitre en la ciudad de Bogotá D.C., lo cual se presenta en el capítulo 6. Para la caracterización de la cuenca de estudio y la aplicación de la metodología, fue necesario realizar una exhaustiva recopilación, revisión y depuración de datos.

El análisis de los resultados de la aplicación de la metodología se muestra y discuten en el capítulo 7.

Consecutivamente, en el capítulo 8 se establece validan los resultados de las afectaciones por inundación, encharcamientos y daños en redes de alcantarillado con la verificación de los datos consolidados de afectación por la ola invernal provistos por el FOPAE, como entidad oficial encargada de recopilar y verificar estos datos a nivel distrital.

Finalmente las conclusiones y recomendaciones tanto de la metodología como de su aplicación en la subcuenca “Salitre Bombeo” se consignan en el capítulo 9.

La cartografía del riesgo público resultado de la aplicación de la metodología RPIU en la subcuenca “Salitre Bombeo” se consigna en el Anexo D.

2 Metodología de la investigación

Para desarrollar la presente propuesta de análisis holístico de riesgo público por inundación fue necesario establecer el enfoque metodológico y las actividades a seguir, que se detallan a continuación.

2.1 Enfoque metodológico

A partir de una consulta inicial de las necesidades y expectativas de investigación que sobre el tema de las inundaciones urbanas tenían las entidades relacionadas con el riesgo público en la ciudad de Bogotá D.C., especialmente la EAAB y el FOPAE, se encontró que, si bien el tema se ha manejado en las últimas décadas, aún existen vacíos en el conocimiento que requieren de los esfuerzos tanto de las empresas públicas y privadas, como del apoyo de la academia para afrontar con éxito la ocurrencia de este tipo de eventos. Se vislumbró una oportunidad de investigación en una temática del riesgo que afecta constantemente a la ciudad de Bogotá D.C.: las inundaciones urbanas, con miras a anticipar dicha ocurrencia, y de esta manera, aportar a la reducción del citado riesgo. Desde luego, para enfrentar las problemáticas del riesgo es necesario para las entidades contar con una directriz que enfoque los pasos a seguir para analizarlas eficientemente.

Para alcanzar los objetivos propuestos, inicialmente se realizó la recopilación de una amplia cantidad de documentos provenientes de diversas fuentes académicas e institucionales, que permitió conceptualizar la relación entre la hidrología, el sistema de alcantarillado pluvial y la afectación a la sociedad por la ocurrencia de inundaciones por falla del sistema de alcantarillado. Posteriormente, se generó una metodología que permitiese evaluar el riesgo público por inundación en áreas urbanas desde un punto de vista holístico de la problemática, es decir, una metodología de evaluación que incluya un análisis integral de los factores que interactúan dando lugar al riesgo efectivo por inundación: la amenaza, la vulnerabilidad, la resiliencia y la mitigación.

Posteriormente, se realizó la selección de la subcuenca para realizar la aplicación de la metodología planteada, denominada subcuenca “Salitre Bombeo”. Su selección se realizó en función de la calidad y la cantidad de la información a implementar, la cantidad y frecuencia de las afectaciones reportadas por el FOPAE en las últimas olas invernales y las inquietudes de investigación de la EAAB en el funcionamiento hidráulico de esta subcuenca. Mediante la implementación de la metodología propuesta se estableció el

comportamiento de la subcuenca “Salitre Bombeo” ante escenarios factibles de evaluación del riesgo público por inundación, que permitiesen simular condiciones climatológicas, de uso del suelo, de crecimiento poblacional, de deterioro de la red, entre otros factores que inciden en la perspectiva de evolución temporal del sistema de alcantarillado y del nivel del riesgo potencial.

Finalmente analizaron los resultados de la aplicación de la metodología propuesta y se estableció una metodología tendiente a evaluar la bondad de los resultados obtenidos en la aplicación partiendo de la información disponible sobre inundaciones o encharcamientos ocurridos en puntos críticos.

2.2 Etapas de la investigación

Para lograr consistencia y coherencia entre el enfoque metodológico y el desarrollo de las actividades, se establecieron los siguientes pasos para alcanzar los objetivos propuestos.

2.2.1 Recopilación de información

Esta etapa incluyó la recopilación de información que permitió desarrollar la conceptualización del modelo mediante la consulta de estudios previos a nivel mundial. Si bien fue una consulta extensa, se reafirmó la intención de establecer una metodología que estuviera acorde con los últimos adelantos teóricos y científicos en el tema. Simultáneamente, se realizó la revisión del marco normativo y conceptual del riesgo público vigente en la ciudad de Bogotá, con el objeto de definir los diferentes aspectos a considerar en la metodología y los componentes a evaluar.

Por otra parte, se recopilaron los datos para la aplicación de la metodología en la subcuenca seleccionada y se realizó la consecución de los programas computacionales que se articulan dentro de la metodología para el cálculo hidrológico, hidráulico e hidrodinámico. El manejo de datos se realizó en plataforma SIG, entre los cuales se tiene los elementos del sistema de alcantarillado, los datos topográficos, la zonificación de usos del suelo, datos hidrológicos, datos de características sociales y demográficas, y demás información que proporciona conocimiento de la subcuenca de aplicación de la metodología propuesta.

2.2.2 Planteamiento de la metodología de análisis

La metodología de análisis del riesgo público por inundación en áreas urbanas que propone la presente tesis se basa en el planteamiento de factores de evaluación del riesgo desde un punto de vista holístico. Esta visión incorpora no solo los factores clásicos del riesgo, amenaza y vulnerabilidad, sino también aquellos que involucran la

capacidad de recuperación de los elementos vulnerables y las acciones que pueden realizar las personas y organizaciones para minimizar los valores de riesgo clásico.

Posterior al planteamiento de los factores a evaluar en la metodología, se determinaron los indicadores que permitirán evaluar cada uno de los factores establecidos. Es de destacar que para la definición de los indicadores de evaluación, se realizó una revisión bibliográfica de los indicadores más apropiados para evaluar cada factor y en especial se revisaron los indicadores disponibles actualmente en la ciudad de Bogotá según la Veeduría Distrital, la Secretaría Distrital de Planeación (SDP), la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE).

Una vez establecidos los índices e indicadores a evaluar, se planteó una escala de valoración para cada uno de los índices que definen a los factores de evaluación del riesgo, según su importancia; por ejemplo, para cada uno de los indicadores de la amenaza, su escala de valoración se define según el impacto o afectación que pueda generar el evento amenazante.

Para realizar la evaluación de algunos de los indicadores y su distribución espacial, se empleó algún software para facilitar esta evaluación, como fue el caso del software hidráulico y geográfico. En el capítulo 4 se establecen cuáles fueron los programas utilizados para evaluar los indicadores anotando sus ventajas y alcances.

Finalmente se estableció la escala de nivel de riesgo que definirá la afectación que puede sufrir un elemento expuesto a la amenaza, considerando las acciones que pueden o no realizarse para minimizarlo y la capacidad de este elemento para volver a enfrentar otra amenaza. Este nivel de riesgo es esencial para establecer la perspectiva temporal de la operatividad de la red de alcantarillado pluvial de la ciudad y el efecto que esto producirá en la población y elementos circundantes. En la escala de nivel de riesgo se establece no sólo un valor de afectación sino sus características más probables. La escala propuesta se ha denominado “Escala de Hernández & Cubillos” por sus autores.

2.2.3 Formulación de escenarios de evaluación

Una vez establecida la metodología de evaluación del riesgo, se requirió definir los escenarios de evaluación que permitiesen anticipar el desempeño futuro del sistema. Estos escenarios incluyeron condiciones del medio respecto a: condiciones climatológicas, uso del suelo, crecimiento poblacional, distribución y estado físico de las redes de alcantarillado pluvial, entre otros agentes y elementos que inciden en las solicitudes generadas en la cuenca para las cuales es necesario evaluar el desempeño del sistema.

2.2.4 Aplicación del modelo conceptual de análisis

Una vez establecida la metodología conceptual de evaluación del riesgo, se realizó la respectiva aplicación de los escenarios propuestos para la subcuenca “Salitre Bombeo” considerando la red de drenaje pluvial como el principal sistema de desagüe de la cuenca. Este análisis incluyó la variabilidad espacial de factores y elementos de la cuenca, para así obtener una distribución espacial de los resultados de la aplicación del modelo, para lo cual se empleó un sistema de información geográfica. Como actividad final de la aplicación, la construcción de la cartografía de riesgo público resultó del cruce y análisis espacial de las variables de amenaza, vulnerabilidad, resiliencia y mitigación seleccionadas. El objeto principal de estos mapas será la fácil identificación de la distribución y cantidad de elementos expuestos al riesgo para la posterior toma de decisiones. (PREDECAN *et ál.*, 2009).

2.2.5 Validación de los resultados del modelo de análisis

Una vez estimado el nivel de riesgo para cada unidad territorial del sistema evaluado, se procedió a validar los resultados con una verificación comparativa de las características de la afectación producida por eventos ocurridos en el pasado y recopilados en los reportes de la ola invernal de los años 2010 y 2011, proporcionados por el FOPAE. Para algunos tramos se cuenta con fotografías obtenidas por la autora en visitas y recorridos de campo.

2.2.6 Conclusiones y recomendaciones

En el capítulo final del presente documento se plantean las conclusiones en relación con el planteamiento teórico de la metodología, así como algunas conclusiones relacionadas con los resultados de la aplicación de la metodología. En relación con los resultados, se establecen conclusiones con respecto al nivel de riesgo público por inundación obtenido para las unidades territoriales de evaluación y la afectación de la infraestructura de la red del sistema de alcantarillado de la subcuenca de estudio, que sustentan el concepto alcanzado sobre la perspectiva temporal de operatividad del sistema de alcantarillado pluvial para el caso específico de la subcuenca “Salitre Bombeo”.

Con respecto a las recomendaciones, por una parte se plantean aquellas relacionadas con los avances metodológicos relacionados con las metodologías de análisis del riesgo público por inundación en áreas urbanas y, por otra parte, las recomendaciones relacionadas con la aplicación de la metodología en la cuenca particular analizada. Asimismo, se plantean opciones para la reducción del riesgo público por inundación y el aumento de la capacidad de resiliencia de la población afectada.

3 Marco normativo y conceptual

En el presente capítulo se trata de forma general el marco normativo en el cual se desarrolla la gestión del riesgo público en Bogotá, realizando una descripción histórica desde la formulación nacional hasta llegar a los decretos distritales. Posteriormente se analizan los conceptos concernientes al riesgo público que se tienen en cuenta en la presente investigación, enmarcados en el Decreto Distrital 423 del 2006. Al final del capítulo se indican las características de los sistemas de drenaje y los tipos de falla generadoras de inundaciones urbanas.

3.1 Marco normativo del riesgo público

Como respuesta a las múltiples afectaciones que ha sufrido la población colombiana producto de eventos naturales y antrópicos no intencionales, entre los que se destacan sismos, remociones en masa e inundaciones, el país demandó la creación de organismos que operarán de forma articulada en la gestión del riesgo público. De acuerdo con el Decreto 423 del 2006 el riesgo público se define como “El daño potencial que, sobre la población y sus bienes, la infraestructura, el ambiente y la economía pública y privada, pueda causarse por la ocurrencia de amenazas de origen natural, socio-natural o antrópico no intencional, que se extiende más allá de los espacios privados o actividades particulares de las personas y organizaciones y que por su magnitud, velocidad y contingencia hace necesario un proceso de gestión que involucre al Estado y a la sociedad” (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2006b).

En el año 1989 se expidió el Decreto Ley 919, mediante el cual se creó la oficina de Prevención y Atención de Desastres a nivel nacional. Como lo reporta DPAE (2009), la gestión del riesgo a nivel nacional actualmente se regula mediante el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (PNPAD) y la Estrategia para Consolidar la Ejecución para la Prevención y Atención de Desastres (i.e. CONPES 3146 de 2001). El funcionamiento de los organismos que intervienen en la gestión del riesgo se establece a partir de un modelo de articulación entre los tres principales sistemas a nivel nacional: Sistema Nacional Ambiental (SINA), Sistema Nacional de Planeación (SNP) y Sistema Nacional para la Prevención y Atención a Desastres (SNPAD). A partir de estos se constituye a nivel regional el Comité Regional para la Prevención y Atención de Emergencias y Desastres (CREPAD) y las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR),

hasta llegar al nivel local municipal que actúa como foco de acción principal en la gestión del riesgo, como se sintetiza en la Figura 3-1.

Figura 3-1: Modelo de articulación de los tres sistemas en torno a la Gestión Local del Riesgo (DPAE, 2009).



En Bogotá D.C. se ha articulado un conjunto de entidades públicas y privadas que intervienen en los aspectos primordiales de la ciudad con la finalidad de generar políticas, normas, recursos, procedimientos y metodologías, contribuyendo en la reducción de pérdidas humanas, económicas y sociales ocasionadas por fenómenos de origen natural o de origen antrópico en el Distrito.

Figura 3-2: Mapa organizacional del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias, SDPAE (FOPAE, 2011).



Dentro del SDPAE se destacan primordialmente el Fondo y la Oficina Coordinadora para la Prevención y Atención de Emergencias en el Distrito Capital, las cuales fueron pioneras en su formulación desde el Acuerdo 17 de 1969, emitido por el Consejo de Bogotá D.C. Las acciones orientadas a minimizar el riesgo público estarían a cargo del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), adscrito a la Alcaldía Mayor y administrado por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias (DPAE) de la Secretaría de Gobierno, anteriormente denominada UPES, cuya función era la de coordinar todas las acciones de Prevención y Atención de Emergencias en el Distrito.

Desde su creación hasta el presente, estas entidades han sufrido múltiples modificaciones tanto en su organización como en sus funciones, debido a los desarrollos normativos de la ciudad. La más reciente modificación, Decreto 413 de septiembre 27 de 2010, suprime a la DPAE de la estructura organizacional de la Secretaria de Gobierno, asignando sus funciones al FOPAE, entidad que a partir de este Decreto, adquiere autonomía administrativa y financiera, así como el ejercicio del liderazgo y coordinación de las políticas de prevención y atención de emergencias en la ciudad (FOPAE, 2011)¹.

El FOPAE tiene dentro de sus objetivos (OPS, 2000):

- Prestar el apoyo económico que sea requerido para la prevención y atención de emergencias y calamidades.
- Financiar un programa de prevención de desastres para el Distrito, con base en estudios e inventarios de riesgos, con énfasis en campañas de educación preventiva orientadas a la población más vulnerable, editando el material didáctico que se requiera.
- Financiar la elaboración de un mapa de amenazas y riesgos para el Distrito.
- Financiar la instalación y operación de sistemas y equipos de información para la prevención, diagnóstico y atención de desastres.
- Adquirir los equipos y elementos necesarios para la prevención y atención de emergencias y atender las necesidades básicas de los damnificados.
- En general, adoptar las medidas necesarias para prevenir desastres o atenuar sus efectos.

3.2 Visión holística de la evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas

De acuerdo con Zonensein *et ál* (2008), el concepto de riesgo tiene un significado variable según el contexto en el que se emplea y, por esa razón, la interpretación adoptada debe ser aclarada previamente a cualquier análisis. En la evaluación del riesgo tradicionalmente se destaca la visión clásica, la cual establece que para su análisis es

¹ Para ampliación de la información histórica de la conformación de las entidades que gestionan el riesgo en la ciudad de Bogotá, por favor remitirse a las páginas web referenciadas al final del presente documento.

necesario conocer el desarrollo de dos aspectos únicos: la amenaza ($\mathcal{A}$) y la vulnerabilidad ($\mathcal{V}$), en donde el riesgo es considerado como el daño potencial que las amenazas pueden generar a los elementos vulnerables Ecuación (3-1)

$$R_p = \mathcal{A} \times \mathcal{V} \quad (3-1)$$

Donde:

$\mathcal{A}$ = Amenaza

$\mathcal{V}$ = Vulnerabilidad

R_p = Riesgo potencial

Esta forma del riesgo se define como riesgo potencial. La integración conceptual de estos dos únicos factores en el análisis del riesgo público genera una respuesta del nivel de afectación que puede llegar a presentar los elementos vulnerables en el instante exacto de ocurrencia del evento amenazante.

Es importante destacar que la relación de la amenaza y la vulnerabilidad en la concepción del riesgo es, como lo expresa Cardona (2001) una relación de convolución, el cual es un concepto matemático que se refiere a la concomitancia y mutuo condicionamiento. Es decir, no se puede hablar de riesgo potencial si el elemento vulnerable no está amenazado, y no existe una condición de amenaza para un elemento, sujeto o sistema si éste no está expuesto y es vulnerable a la acción potencial que representa dicha amenaza. En otras palabras, como lo expresa Cardona (2001) "...no existe amenaza o vulnerabilidad independientemente, pues son situaciones mutuamente condicionantes que se definen en forma conceptual de manera independiente para efectos metodológicos y para una mejor comprensión del riesgo".

Según lo anteriormente descrito y empleando la nomenclatura de Cardona (2005), es posible estimar el riesgo potencial establecido por la Ecuación (3-1) si se conoce la amenaza $\mathcal{A}_i$, la cual se entiende como la probabilidad de que un suceso con una intensidad mayor o igual a i se presente durante un periodo de exposición t , y la vulnerabilidad $\mathcal{V}_\ell$, entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto ℓ , a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño ante la ocurrencia de un suceso con una intensidad i . Por tanto, una formulación más elaborada del riesgo potencial, estará dada por la ecuación (3-2).

$$R_{Pie} \Big|_t = f \left(\mathcal{A}_i \mathcal{V}_\ell \right) \Big|_t \quad (3-2)$$

En años recientes se han observado cambios en los procesos climáticos del planeta que han aumentado la frecuencia de eventos amenazantes, producto de procesos naturales y

de las intervenciones antrópicas al medio ambiente. No obstante el estudio de ocurrencia de los eventos amenazantes y su relación con el cambio climático no se incluye dentro del alcance de esta investigación, si se plantea el desafío de involucrar en la metodología a proponer un factor que permita establecer la capacidad de recuperación de los elementos vulnerables, en caso de repetirse o mantenerse el nivel de amenaza. Esta situación ha sido observada en el caso colombiano, en donde al presentarse una segunda ola invernal en el primer semestre de 2011, aún no se había superado la emergencia de la primera ola invernal producida en el segundo semestre de 2010.

Dada esta situación, el tercer factor a involucrar en la ecuación de riesgo público será el de “Resiliencia” por medio del cual se evalúa la capacidad de las personas, las organizaciones, la infraestructura y los ecosistemas de asimilar un impacto negativo y de recuperar su funcionalidad.

Por otra parte, en la visión clásica del riesgo generalmente se involucra a la comunidad dentro de la vulnerabilidad, considerándola como un actor pasivo que sufre la amenaza o que incluso, mediante sus acciones, puede aumentar las situaciones de riesgo, como en el caso de los malos manejos de residuos sólidos que obstruyen los sistemas de drenaje. Sin embargo, no se ha considerado un factor que involucre las acciones antrópicas positivas que la comunidad y las organizaciones pueden realizar para disminuir su situación de vulnerabilidad o para intentar restablecer las condiciones naturales de drenaje que permitan una convivencia armónica con el medio ambiente.

Las acciones remediarias posteriores a las afectaciones generan un aumento en los gastos de la nación y de los municipios, los cuales son difíciles de controlar durante los estados de emergencia. La planeación previa de las acciones antrópicas que pueden llegar a reducir las afectaciones son la clave para optimizar los recursos y mejorar la calidad de vida de las poblaciones en riesgo potencial. Considerando esta situación, el cuarto factor a involucrar en la ecuación del riesgo será la “Mitigación”, definido por las acciones antrópicas constituidas por políticas, acciones civiles y desarrollo de infraestructura que permitirán la minimización del riesgo existente.

Una vez incluidos los cuatro factores a la ecuación del riesgo público: amenaza, vulnerabilidad, resiliencia y mitigación, ésta toma un carácter holístico. Por consiguiente la ecuación de riesgo público holístico toma la forma de ecuación de riesgo efectivo expresada en la ecuación (3-3), la cual muestra la forma extendida de la ecuación del riesgo efectivo, en donde se relacionan linealmente todos los factores que intervienen en la visión holística del riesgo. La ecuación (3-4) presenta la forma de la ecuación del riesgo efectivo en la cual ésta se presenta como el producto de la ecuación del riesgo potencial y los factores que pueden llegar a reducir sus efectos, la resiliencia y la mitigación.

$$R_E|_t = f(A_i V_e R_s_e M)|_t \quad (3-3)$$

$$R_E|_t = f(R_{Pie} R_s M)|_t \quad (3-4)$$

Donde:

A_i : Amenaza, con intensidad i

V_e : Vulnerabilidad del elemento e

R_s : Resiliencia

M : Mitigación

R_p : Riesgo potencial

R_E : Riesgo efectivo

Si se conoce el riesgo potencial $R_{Pie}|_t$ para cierto periodo de exposición, el nivel de resiliencia R_s del elemento expuesto e y el nivel de mitigación M de las acciones implementadas, es posible definir el riesgo efectivo $R_E|_t$ que puede sufrir el elemento expuesto.

Por medio de esta concepción holística del riesgo público se llega a una evaluación más completa, la cual considera los factores relacionados en la concepción clásica y además integra la vulnerabilidad social, la capacidad de resiliencia y acciones que propenden por mitigar los efectos del riesgo público por inundación en áreas urbanas.

3.3 Factores de la evaluación del riesgo por inundación en áreas urbanas

La evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas incluye los elementos que se involucran en el escenario de riesgo, los cuales tradicionalmente evocan tres fases principales de análisis: la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo, a las cuales se adicionan el análisis de la resiliencia y de la mitigación. No obstante estos componentes hacen parte primordial de la evaluación del riesgo, es necesario enfocar su influencia dentro del análisis del riesgo por inundación en áreas urbanas, dadas las configuraciones particulares que conforman el medio en el que se desarrollan.

3.3.1 Amenaza de inundación en áreas urbanas

La amenaza por inundación constituye una de las afectaciones más peligrosas para la vida humana, por tanto la identificación de los elementos que la constituyen marcan una etapa importante de evaluación en el análisis del riesgo, toda vez que brinda la posibilidad de establecer la potencialidad de ocurrencia y magnitud de eventos que pueden llegar a afectar a los elementos vulnerables.

Como se describió previamente, la amenaza se define como una condición latente de posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural, la cual, en el caso de áreas urbanas en donde las cuencas de drenaje han sido modificadas a través de los años es posible definir los orígenes de la amenaza por inundación como un proceso, que tiene un alto porcentaje de acrecentamiento en su ocurrencia y magnitud debido a las intervenciones que han realizado las comunidades en su deseo de modificar y amoldar el territorio para su beneficio inmediato.

Los elementos que constituyen el sistema de drenaje pluvial urbano pueden verse afectados ante la ocurrencia de eventos que superen la capacidad hidráulica para la cual fueron diseñados y construidos. En el caso de las redes de alcantarillado, las cuales se diseñan con criterios de flujo a superficie libre, su correcto funcionamiento se ve afectado cuando el caudal llena la sección hidráulica de la tubería y se genera flujo a presión.

Adicionalmente, los procesos de cambio climático sufridos en la actualidad divisan un panorama en el cual es cada vez más probable la ocurrencia de eventos extremos que pueden llegar a sobrepasar las expectativas de afectación debido a este tipo de amenazas. No obstante, éste es un tema de amplia discusión y estudio en la actualidad, el cual no se analizará a profundidad en la presente investigación, legando la oportunidad de posibles desarrollos del conocimiento en este sentido, los cuáles sean representativos de nuestro medio.

3.3.2 Vulnerabilidad social

De acuerdo con Blaikie *et ál*, (1996), la vulnerabilidad social hace referencia a las características propias de una persona o comunidad desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural. Estas tres características “anticipar, resistir y recuperarse” enmarcan una serie de procesos que, si bien están ligados a un mismo individuo, difieren en su actuación frente a la concepción del riesgo público. A continuación se emplea la palabra “individuo” para relacionar tanto a una persona como de un grupo de personas.

La primera capacidad del individuo frente a una posible amenaza es la de “anticipar”, en donde se entiende que la anticipación puede llevar a tomar la decisión de abandonar el territorio expuesto a la amenaza o apropiarse de técnicas y herramientas que le permitan al individuo resistir los efectos de la amenaza. Si se presenta la primera opción, el individuo anticipa los efectos de una probable amenaza y abandona el lugar de posible afectación, por lo cual al no existir exposición del individuo a la amenaza no existirá riesgo público. Por otro lado, si el individuo decide permanecer en el territorio y se arma de técnicas y herramientas que le permitan hacer frente para resistir la amenaza potencial, se estaría hablando de técnicas de mitigación, tema que se discutirá más adelante. Por lo tanto es posible concluir que si bien la anticipación es un mecanismo para evitar o mitigar los efectos de una amenaza, no es un factor a evaluar dentro del término de vulnerabilidad social en la evaluación del riesgo público.

La segunda capacidad del individuo descrita por Blaikie (*ibíd*), es la de “resistir” los efectos de una amenaza, en donde la vulnerabilidad social será una medida efectiva de cuán susceptible es un individuo expuesto a ser afectado por un fenómeno perturbador, por lo cual las características del individuo asociadas a la vulnerabilidad social serán aquellas que le permitan resistir los efectos de la amenaza a la cual está expuesto.

La tercera capacidad del individuo según Blaikie (*ibíd*), hace referencia a las características del individuo para “recuperarse” del impacto de una amenaza, lo cual constituye una compleja relación entre los elementos propios del individuo y su relación con la atención efectiva que puede recibir de parte de la comunidad, posteriormente a la ocurrencia del evento amenazante. Esta capacidad de recuperación además debe incluir una evaluación de la velocidad de recuperación de un elemento vulnerable frente a los efectos de nuevas o recurrentes amenazas. Según la visión holística del riesgo esta capacidad de recuperación de un elemento es tan compleja que es preferible tratarla como un factor independiente denominado “resiliencia”.

Por tanto desde la perspectiva del riesgo, la vulnerabilidad social es una combinación de características de una persona o grupo de éstas, derivadas de sus condiciones sociales y económicas, que le permiten resistir los efectos inmediatos de una amenaza específica. Altos niveles de vulnerabilidad implican un serio resultado ante eventos amenazantes, siendo una compleja combinación tanto de las cualidades de las amenazas como de las características de la población para resistirlas. Así, desde esta perspectiva, “...la vulnerabilidad es un término relativo y específico, que siempre implica una vulnerabilidad a una amenaza particular” (*ibíd.*). Por tanto, los grupos más vulnerables a los factores de amenaza serán aquellos que tienen mayor dificultad de respuesta inmediata en el caso de presentarse un fenómeno amenazante específico.

3.3.3 Vulnerabilidad física del área de estudio

De acuerdo con FOPAE (2009) la vulnerabilidad física establece el grado de afectación de un elemento o conjunto de elementos en riesgo, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada. Por tanto, en este documento se aborda la vulnerabilidad física para referirse a las condiciones y características propias del entorno en que se localizan los elementos que pueden llegar a ser afectados por la amenaza de inundación en áreas urbanas.

Considerando que las áreas urbanas han sido adecuadas para suplir necesidades humanas, es necesario establecer cuál es la actual “Geografía Urbana”. Éste es un término amplio debido a que relaciona no solo el estudio de la estructura morfológica del territorio urbanizado sino las funciones que se llevan a cabo en él. Dentro de la geografía urbana se destaca el estudio del paisaje urbano como resultado de la interacción de tres variables: el territorio, el uso del suelo y la edificación.

Normalmente en una ciudad, el territorio presenta una alteración con respecto a la morfología original, lo cual se ve representado en la actual topografía del terreno. Por otra parte, la información geológica puede dar una visión de las unidades estratigráficas y las configuraciones originarias del terreno, considerando que una gestión efectiva del territorio en las zonas urbanas puede minimizar los efectos adversos como la degradación de suelos, agua y paisaje, mediante la identificación de zonas más susceptibles a los efectos de las amenazas.

El concepto de uso del suelo, en donde el hombre establece el destino del territorio y se conforman nuevas unidades, se relaciona desde el punto de vista hidrológico con el incremento del porcentaje de áreas impermeabilizadas y la reducción de la infiltración en el suelo, en donde las áreas han sido revestidas y la cobertura vegetal removida. Las áreas ubicadas en zonas más bajas que el nivel de drenaje natural evidencian una mayor susceptibilidad a acumular las aguas lluvias y aquellas que rápidamente discurren por las áreas impermeables, configurando zonas con una alta vulnerabilidad a los efectos de la amenaza por inundación.

Por último, la vulnerabilidad de las edificaciones depende de una serie de consideraciones estructurales como la resistencia estructural y deficientes condiciones de calidad en el proceso estructural y los materiales empleados. Además, las edificaciones son más vulnerables a medida que se incrementa la altura y la velocidad de las aguas de inundación.

3.3.4 Vulnerabilidad estructural y funcional asociada al sistema de alcantarillado pluvial

La vulnerabilidad estructural y funcional considerada en el presente numeral hace referencia a la susceptibilidad que pueden presentar las redes y demás elementos del sistema de alcantarillado pluvial, para resistir los efectos de situaciones amenazantes o para condiciones para las cuales no fueron construidos. La función de vulnerabilidad de los elementos expuestos a la amenaza estará asociada a sus características estructurales que determinan el remanente de su vida útil, como el material y la edad de instalación (i.e. vulnerabilidad estructural) y, por otra parte, a la relación entre el tipo de falla de la red y la acción de éste sobre el elemento expuesto (i.e. vulnerabilidad funcional).

▪ Identificación de la falla en el sistema de alcantarillado pluvial

La amplia modificación de los sistemas de drenaje natural en los territorios urbanos ha incrementado las fuentes de posible falla y las modalidades de daño a los elementos involucrados dentro de la infraestructura urbana. Para el caso de la red de alcantarillado pluvial (FOPAE, 2009) considera factibles Fuentes Generadoras de Daño (FGD) todos los elementos de la red, los cuales pueden llegar a presentar diversos tipos de falla y generar afectación a la comunidad vulnerable.

Según FOPAE (op.cit.) para que se produzca una falla sobre una fuente generadora de daño deben actuar dos tipos de factores: los agentes internos propios del elemento, los cuales se consideran permanentes y por otro lado los factores desencadenantes generados por eventos de precipitación externa. Así mismo, se define la falla como la reducción en la capacidad de un sistema para cumplir su función u objetivo, considerando que existen diferentes grados de falla. Teniendo en cuenta la magnitud e intensidad del evento amenazante es posible definir diversos tipos de la falla del alcantarillado pluvial, los cuales son definidos por (*ibíd.*):

- **Obstrucción:**

Taponamiento parcial o total de uno o varios elementos de una red o estructura.

- **Desplazamientos:**

Se define como la longitud de desplazamiento comprendida entre la posición inicial y final del extremo de un elemento de la red. Es posible que estos desplazamientos sean horizontales y/o verticales, y pueden ser medibles con respecto a su posición de instalación.

- **Volcamiento:**

Movimiento que implica la rotación de los elementos apoyados sobre una base, bajo la acción de la gravedad y las fuerzas ejercidas por unidades adyacentes.

- **Caída:**

Es el descenso de los elementos que pueden estar a un nivel superior del suelo. La caída puede o no implicar rotura o interrupción total de la funcionalidad del sistema y dependerá de las características propias del elemento.

- **Rotura:**

Considerando el material en que está constituido cada elemento del sistema y la relación esfuerzo – deformación de estos materiales, es posible establecer el punto en el cual el material fallará al no poder soportar mayores esfuerzos. En forma visual la rotura se evidencia como la pérdida de continuidad de un elemento. La fractura puede ser parcial cuando se trata de fisuramiento y total cuando se trata de fracturamiento, implicando daño estructural y colapso.

- **Fuga:**

La fuga hace referencia al escape de una sustancia gaseosa o líquida, bien sea de un sistema de generación, transporte, almacenamiento o de un elemento de una red de conducción, que puede provocar algún daño o desequilibrio, irreversible o no, en el medio inicial. La fuga cambia las concentraciones del material que se ha escapado y del medio circundante y puede tener efectos secundarios como procesos de contaminación en el caso de sustancias tóxicas.

- **Represamiento:**

Consiste en la acumulación de flujo debido a la afectación de un elemento de la red de alcantarillado. Es el caso en el que se presenta una saturación del sistema y el drenaje

no se produce normalmente induciendo a la falla funcional de fuga. Este tipo de falla se produce por un periodo variable de tiempo, durante el cual el sistema recupera su capacidad de transporte.

3.3.5 Resiliencia

La resiliencia involucra aquellas características de las personas, organizaciones, infraestructuras y ecosistemas, que les permiten recuperarse y seguir adelante o en funcionamiento una vez han sufrido el impacto de un evento amenazante. Es importante resaltar que la resiliencia, es una característica propia de cada organismo y que puede ser fortalecida mediante la identificación de las amenazas a las que se encuentra expuesto. Por esta razón, el riesgo efectivo no puede considerarse ni estático ni permanente, su intensidad y área de afectación dependerá de la interacción de los eventos amenazantes y los organismos vulnerables, los cuales tendrán diferentes niveles de capacidad de recuperación ó resiliencia dependiendo de sus condiciones antecedentes.

Cuando el organismo vulnerable sufre los efectos de una primera amenaza, se considera que estaba en el máximo de su capacidad para afrontar su recuperación, si y solo si, el organismo era consciente de su vulnerabilidad ante la amenaza y se preparó fortaleciendo su resiliencia. No obstante, si los efectos de las amenazas son frecuentes, el organismo sufrirá un detrimento importante en su capacidad de recuperación posterior, incrementando el riesgo efectivo en los siguientes episodios de afectación. Por otra parte, cuando los organismos conocen que son vulnerables pero no fortalecen su resiliencia, es decir no se preparan para los posibles efectos de la amenaza, ésta puede tomarlos por sorpresa, llegando a convertirse en desastre e incluso acabando con la vida del organismo.

Por consiguiente, no solo es necesario identificar el riesgo potencial al cual se está expuesto sino fortalecer la resiliencia de los organismos, y así ser capaces de recuperarse de los efectos de las amenazas. El desarrollo de las estrategias de fortalecimiento de la resiliencia se realiza en función de cada grupo de vulnerabilidad identificado: resiliencia social (i.e. en relación con las personas), resiliencia física (i.e. en relación con el entorno) y resiliencia estructural y funcional del sistema de alcantarillado.

3.3.6 Mitigación

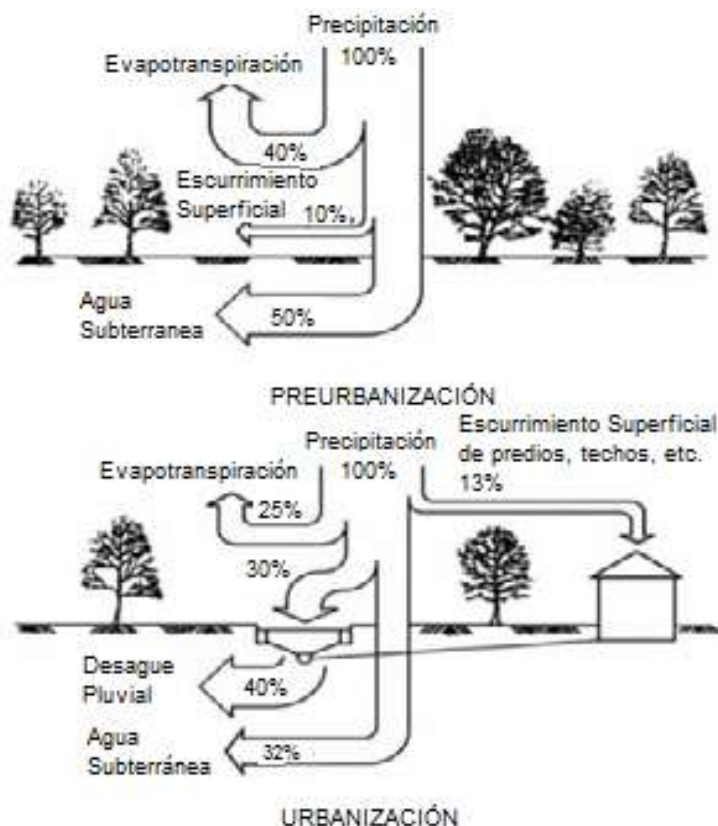
La mitigación comprende las acciones que propenden por reducir el riesgo existente, lo cual incluye las medidas preventivas, correctivas y de conservación que permitan restablecer las condiciones de drenaje dentro del área urbana. En este aspecto es de especial interés definir las medidas tanto estructurales como no estructurales, que correctamente implementadas sobre los componentes del riesgo potencial, resultarán en una reducción del riesgo efectivo disminuyendo la probabilidad de que el riesgo efectivo se materialice en desastres.

En este sentido se presta especial atención a los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS, por sus siglas en inglés) los cuales contribuyen a la sedimentación de sólidos suspendidos totales y la decantación de contaminantes particulados, por lo cual evitan la acumulación de materiales que pueden llegar a afectar la calidad de agua del cuerpo receptor y la obstrucción del flujo en las redes del sistema de drenaje debido a la sedimentación de estas partículas. En la presente investigación se realiza una descripción general de algunos de estos mecanismos, destacando sus beneficios como atenuadores del caudal máximo en los procesos lluvia-escorrentía y la amplitud del tiempo de retraso del flujo para minimizar los efectos del agua lluvia en su recorrido por la cuenca urbanizada, realizando recomendaciones de su uso en la implementación de la reducción del riesgo por encharcamiento e inundación en la subcuenca de estudio.

3.4 Impactos de la urbanización en relación con el riesgo público por inundación

Las inundaciones urbanas aumentan su frecuencia y magnitud toda vez que se alteran las características del balance hídrico dentro de la cuenca urbanizada, Figura 3-3, en donde se incrementa la impermeabilización del suelo y se conducen todas las aguas a través de sistemas que pueden llegar a ser progresivamente insuficientes.

Figura 3-3: Características del balance hídrico en una cuenca urbana. (Tucci, 2007).



Como lo describe Leopold (1968), la urbanización corresponde al cambio de uso del suelo más fuerte que puede sufrir un territorio, por lo cual la hidrología del área se verá afectada por cuatro efectos que se interrelacionan:

- **Cambios en los servicios hidrológicos:** Corresponde a la sustitución del ambiente natural: el río, sus canales y sus valles, por un ambiente netamente urbano. Tucci (2007) relaciona algunos de los elementos urbanos que generan afectación: (a) puentes y taludes de calles que obstruyen el escurrimiento; (b) reducción de sección del escurrimiento por rellenos en los puentes y para construcciones en general; (c) depositación y obstrucción de ríos; canales y conductos por basuras y sedimentos; (d) proyectos y obras de drenaje inadecuados, con diámetros que disminuyen hacia aguas abajo, drenaje sin escurrimiento.
- **Cambios en las características del pico de caudal:** Las áreas impermeables, incapaces de infiltrar, comunican rápidamente la escorrentía llegando a los sistemas de drenaje de forma súbita, disminuyendo el tiempo de respuesta de la cuenca y aumentando los picos de caudal. Tucci (2007) identificó que el aumento de los caudales máximos puede ser de 7 veces el registrado en condiciones de pre-urbanización (Figura 3-4).
- **Cambios en el volumen de escorrentía total:** El comportamiento de la escorrentía es gobernada principalmente por las características de infiltración del suelo, la cual a su vez está relacionada con la pendiente del terreno, el tipo de suelo y la cobertura vegetal. Al no existir infiltración en las nuevas áreas impermeables toda la precipitación es convertida en escorrentía (Figura 3-5).
- **Cambios en la calidad del agua:** El agua lluvia actúa como agua de lavado para la cuenca, arrastrando los residuos abandonados en las superficies y la atmósfera; en la cuenca urbanizada, especialmente son lavados los sedimentos provenientes de desechos de construcción y la basuras. Adicionalmente, las conexiones erradas de aguas residuales al sistema de alcantarillado pluvial conducen directamente el agua sin tratamiento a los cuerpos receptores. Los procesos de acumulación y lavado en cuencas urbanas son actualmente tema de estudio, en donde diversos investigadores han establecido metodologías para representar adecuadamente el comportamiento de la escorrentía y de la contaminación asociada (Estupiñán, 2009), así como la medición y análisis del fenómeno de primer lavado (Duarte, 2009).

Según lo mencionado anteriormente, es posible afirmar que los cambios generados por la urbanización le adicionan al drenaje de alcantarillado dos graves problemáticas, las cuales impactan al medio ambiente y a la población:

- Las conexiones erradas provenientes del sistema de alcantarillado sanitario al sistema pluvial, por lo cual se descargan altas concentraciones de materia orgánica y metales sin tratamiento alguno. Asimismo, las conexiones erradas del sistema de alcantarillado pluvial al sanitario aumenta los caudales combinados dificultando su tratamiento.

- La construcción excesiva de canales y conductos, lo cual transfiere las inundaciones de un lugar a otro dentro de la ciudad. La construcción de estas obras representan costos insostenibles para las empresas prestadoras del servicio, por lo cual, el rezago en infraestructura va en aumento al igual que las áreas afectadas por inundaciones y encharcamientos.

Figura 3-4: Hidrograma unitario hipotético para un área urbana (Leopold, 1968).²

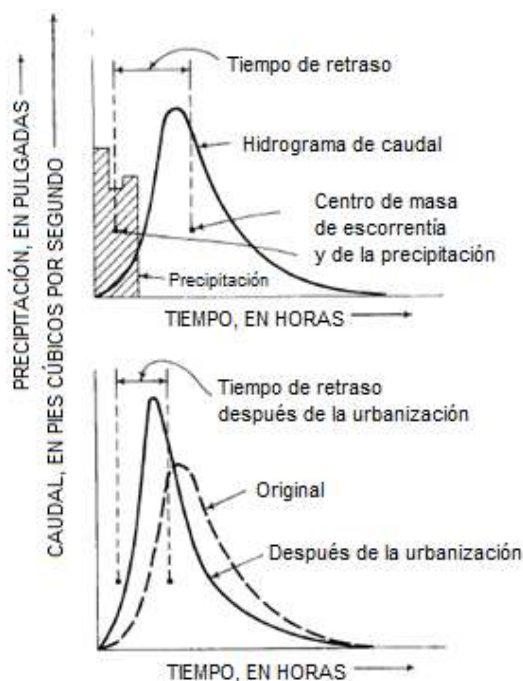
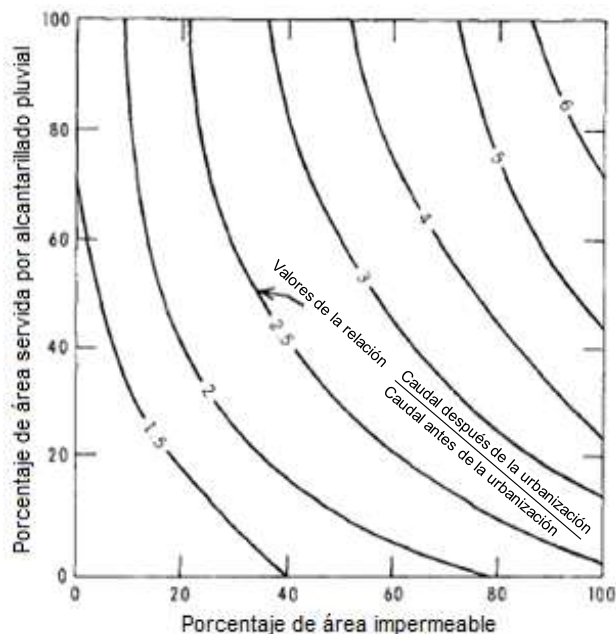


Figura 3-5: Efecto de la urbanización en la inundación anual de un área de drenaje de 1 milla cuadrada (Leopold, 1968).



3.5 Consideraciones de diseño del alcantarillado pluvial

El diseño de las obras para el manejo de las aguas urbanas deberá considerar aquellos factores propios de la urbanización y sus efectos, expuestos en el numeral 3.4, considerando que uno de los sistemas indispensables para el óptimo desarrollo urbanístico es un sistema de drenaje urbano sostenible que funcione correctamente.

De acuerdo con Chow *et ál* (1994) las siguientes restricciones y suposiciones son de uso común en la práctica de diseño de alcantarillado de aguas lluvias:

² Tiempo de retraso: Tiempo desde el centro de masa de la lluvia de exceso hasta el pico del hidrograma. Lapso de tiempo también conocido como retraso de la cuenca.

- Existe flujo a superficie libre para los caudales de diseño; es decir, el sistema de alcantarillado se diseña para “flujo gravitacional”; idealmente no se consideran ni estaciones de bombeo ni alcantarillados presurizados.
- Las tuberías de alcantarillado son de sección circular con diámetros comerciales no menores de 8 pulgadas.
- El diámetro de diseño es el menor diámetro comercialmente disponible que tenga una capacidad de flujo igual o mayor que el caudal de diseño.
- Los alcantarillados de aguas lluvias deben colocarse a una profundidad tal que no sean susceptibles de congelamiento, que sean capaces de drenar sótanos y que tengan un colchón lo suficientemente grande para prevenir los rompimientos debidos a cargas en la superficie del terreno. Teniendo en cuenta esto, deben especificarse las profundidades de recubrimiento mínimas.
- A realizar el empate de los colectores en el pozo, sus diámetros y cotas de clave y batea. Como reglas generales, el colector de salida será de un diámetro igual o mayor a los de entrada y la cota batea del colector de salida será menor que las cotas de batea de los colectores de entrada al pozo.
- Con el objeto de prevenir o reducir la sedimentación excesiva de material sólido en los alcantarillados, debe especificarse una velocidad de flujo mínima permisible para el caudal de diseño o cuando el tubo fluya a máxima capacidad con flujo gravitacional.
- Para prevenir la socavación y otros efectos indeseables causados por una alta velocidad de flujo, también debe especificarse una velocidad máxima permisible.
- En cualquier nodo o pozo de inspección, la cota clave de la tubería del alcantarillado de aguas abajo no puede ser menor que la cota clave de cualquiera de las tuberías de alcantarillado aguas arriba de ese nodo.
- El sistema de alcantarillado es una red dendrítica o con brazos que converge en la dirección aguas abajo sin ningún circuito cerrado.

El cálculo del caudal de diseño para un alcantarillado pluvial o combinado, deberá realizarse con un método lluvia-escorrentía, el cual será seleccionado principalmente en función del área de la cuenca y la disponibilidad de datos para emplear el modelo. Conforme con Chow et ál (1994), la formulación matemática de modelos para los sistemas de aguas urbanas distribuidos tanto en el tiempo como en el espacio es una tarea complicada. Por consiguiente, algunas veces se ignora la variación espacial y el sistema se maneja como un sistema agregado. Algún tipo de variación espacial puede introducirse dividiendo el sistema de la cuenca en varios subsistemas, cada uno de los cuales se considera como agregado, y luego se unen estos modelos de sistemas agregados para producir un modelo del sistema completo. El Método Racional empezó a utilizarse alrededor de la mitad del siglo XIX y es probablemente el método más utilizado para el diseño de alcantarillados de aguas lluvias (Pilgrim, 1986; Linsley, 1986; tomado de Chow et al, 1994). De acuerdo con MinDesarrollo (2000), por medio de este método es posible calcular el caudal pico de las aguas lluvias con base en la intensidad media del evento de precipitación con una duración igual al tiempo de concentración del área de drenaje y un coeficiente de escorrentía.

La ecuación del Método Racional es:

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (3-5)$$

Donde:

Q : Caudal (L/s)

C : Coeficiente de escorrentía, $0 \leq C \leq 1$ (adimensional)

i : Intensidad de la precipitación ($L/s \cdot ha$)

A : Área de drenaje (ha)

En áreas urbanas, el área de drenaje usualmente está compuesta de subáreas o subcuencas de diferentes características superficiales. Como resultado, se requiere un análisis compuesto que considere las diferentes características superficiales. Las áreas de las subcuencas se denominan A_j y los coeficientes de escorrentía para cada una de ellas C_j . La escorrentía pico se calcula empleando la siguiente forma de la ecuación del Método Racional:

$$Q = i \sum_{j=1}^m C_j \cdot A_j \quad (3-6)$$

Donde m es el número de subcuencas drenadas por un alcantarillado (Chow et al, 1994). En el Método Racional, el caudal pico ocurre cuando toda el área de drenaje está contribuyendo, y éste es una fracción de la precipitación media bajo las siguientes suposiciones:

- El caudal pico en cualquier punto es una función directa de la intensidad i de la lluvia, durante el tiempo de concentración para ese punto.
- La frecuencia del caudal pico es la misma que la frecuencia de la intensidad de precipitación considerada en el cálculo.
- El tiempo de concentración está implícito en la determinación de la intensidad media de la lluvia por la relación anotada en la primera suposición.

De acuerdo con MinDesarrollo (2000), el Método Racional es adecuado para áreas de drenaje pequeñas hasta de $700 ha$ ($7 km^2$). Cuando son relativamente grandes, puede ser más apropiado estimar los caudales mediante otros modelos lluvia-escorrentía que representen mejor los hietogramas de precipitación e hidrogramas de respuesta de las áreas de drenaje y que eventualmente tengan en cuenta la capacidad de amortiguamiento de las ondas dentro de la red de colectores.

3.6 Mecanismos de falla generadores de inundación en áreas urbanas

Las inundaciones fluviales son eventos naturales que se producen periódicamente en las llanuras aluviales de los ríos, como resultado de eventos de precipitación intensa en la

cuenca. Los excesos de caudal líquido que la sección hidráulica del cauce natural no puede transportar son conducidos a través de las llanuras, acompañados de depósitos de sedimentos. Este proceso de dinámica fluvial hace parte de la maduración natural del cauce y se observa más fácilmente en aquellos ríos que han sido poco intervenidos, los cuales buscan libremente su equilibrio hidráulico y sedimentológico.

El primer mecanismo de falla generador de inundaciones en un cauce natural ó en un canal a cielo abierto, será la “inundación fluvial” la cual se caracteriza por el desborde de la lámina de agua por arriba de la cota máxima de la orilla del cauce más frecuente. Según Tucci (2007), los ríos generalmente poseen dos lechos: el lecho menor, donde el agua escurre en la mayoría del tiempo y un lecho mayor ocupado parcialmente por eventos con periodo de retorno igual o mayor de 1,5 a 2 años. En concordancia, Leopold (1968) expresa que la creciente media anual multianual tiene un periodo de retorno de 1,5 a 2 años, en donde, la inundación puede presentarse sin necesariamente ocupar toda la llanura de inundación o no existir por corresponder al caudal de banca llena del lecho menor.

Figura 3-6: Denominación de los lechos de los ríos. Adaptado de Tucci (2007).



Una vez la lámina de agua supera la cota más alta del lecho menor, ésta se traslada hasta cubrir una parte o la totalidad del lecho mayor y posteriormente el agua puede retornar al canal principal (lecho menor) para ser evacuada ó establecerse en áreas de aquietamiento y retención. El mecanismo de falla descrito ha sido ampliamente reportado en la literatura mundial, estableciéndose como un proceso natural que ha impulsado el desarrollo de estructuras hidráulicas desde tiempos memoriales y que produce tierras fértiles en donde tradicionalmente se ha desarrollado la agricultura, como en el caso de la llanura de inundación del río Nilo. La situación de riesgo solo se presenta cuando la población invade la llanura de inundación y establece sus viviendas sin control ni planeación dentro del territorio.

Como se estableció en el numeral previo, en las áreas urbanas los cauces naturales han sido canalizados en sistemas de drenaje pluvial compuestos por tramos de redes de tuberías, canales y estructuras hidráulicas complementarias³, por tal razón, el sistema de

³ El Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, RAS – 2000, establece las condiciones requeridas para la concepción y desarrollo de sistemas de recolección y

falla generador de inundaciones en áreas urbanas tendrá implícito dos mecanismos de falla generadores de inundación adicionales.

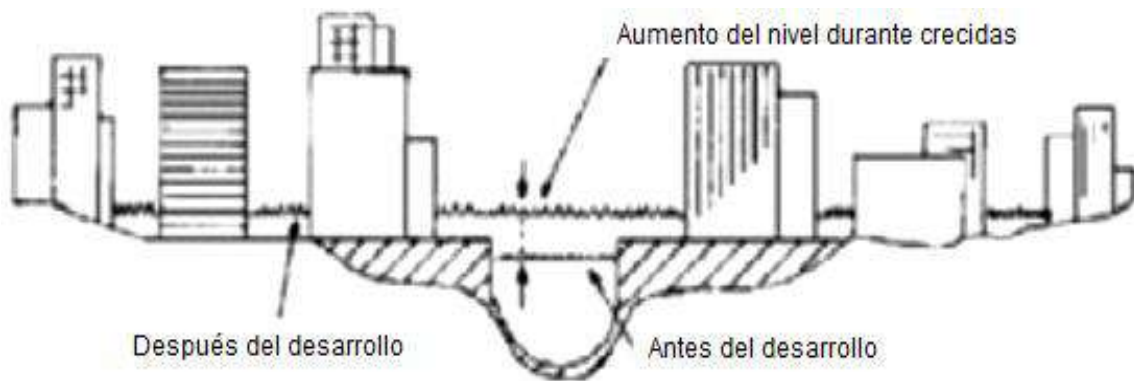
El segundo mecanismo de falla generador de inundaciones en áreas urbanizadas es la “falla funcional del sistema de alcantarillado pluvial” la cual se presenta cuando el sistema de alcantarillado pluvial no es capaz de drenar las aguas, producto de la presurización de la tubería y posterior aumento de nivel dentro del sistema de alcantarillado hasta alcanzar la calzada. Este tipo de falla es identificable mediante el análisis del sistema de alcantarillado, para lo cual se utiliza un modelo matemático hidráulico que sea capaz de representar la presurización del sistema. Uno de los efectos esperados de esta falla en el sistema de alcantarillado, es la salida de las aguas hacia la superficie lo que puede llegar a afectar a los elementos vulnerables.

Adicionalmente, cuando se produce la falla funcional del sistema de drenaje y se presentan lluvias locales, se incrementa la problemática con encharcamientos e inundaciones pluviales, debido a que el agua de escorrentía no puede ser correctamente drenada, depositándose en aquellas áreas más bajas que el nivel de drenaje principal, formando fosas o cuencos inundables.

El tercer mecanismo de falla generador de inundaciones en áreas urbanas será la “falla estructural del sistema de alcantarillado pluvial”. Este mecanismo de falla es propio de áreas urbanas y se traduce en la falla estructural producida en uno o varios de los elementos del sistema de drenaje pluvial. No obstante, debido a que en la mayor parte de las ciudades del mundo que disponen de alcantarillado se cuenta con uno de tipo combinado, aquellas que tienen sistemas separados sufren de una alta cantidad de conexiones erradas y debido a la alta cantidad de agentes contaminantes provenientes del lavado de la cuenca, es necesario incluir en la vulnerabilidad funcional del alcantarillado estas temáticas. En este aspecto se recalca que las particularidades que deben ser consideradas para la correcta modelación del nivel de riesgo público por aguas sanitarias predominantemente, como por ejemplo la afectación en la salud, es una oportunidad de investigación que queda abierta para futuros estudios.

evacuación de aguas residuales y pluviales, así como “...las disposiciones de obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional en las etapas de conceptualización, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y seguimiento de todas y cada una de las obras”. En su Título D “Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales”, incluye “los elementos de sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales y/o pluviales que conforman los alcantarillados sanitarios, pluviales y combinados, sus diferentes componentes y estaciones de bombeo. Se consideran además nuevas tecnologías y sistemas de disposición in situ como alternativas a los sistemas convencionales”.

Figura 3-7: Ocupación de las terrazas de inundación. Tucci (2007).



Los mecanismos de falla relativos a la red de alcantarillado pluvial tienen múltiples causas, como las identificadas por Tucci (2007): el aumento de impermeabilización del suelo, aumento de la escorrentía y la presencia de obstrucciones o antropobarreras que se generan a la escorrentía.

3.7 Sistemas de alcantarillado en la ciudad de Bogotá D.C.

En las áreas urbanas el cambio de la cobertura natural del terreno a superficies impermeables ha incentivado la canalización y conducción de los drenajes naturales de las cuencas, estableciéndose los sistemas de alcantarillado sanitario, pluvial y combinado. En la capital de la República de Colombia, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) es la encargada de garantizar la sustentabilidad hídrica en lo referente a los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado de la ciudad de Bogotá y de los municipios de la región.

Los sistemas de drenaje de la ciudad los define la EAAB (2006) como:

- **Alcantarillado Sanitario:** Es el sistema de recolección diseñado para llevar las aguas domésticas e industriales.
- **Alcantarillado pluvial:** Es el sistema compuesto por todas las instalaciones e infraestructura destinada a la evacuación, recolección, conducción de aguas lluvias, drenaje de la escorrentía superficial, con el fin de controlar las crecientes y mitigar el riesgo por inundación en época de invierno de acuerdo con las condiciones topográficas, hidrológicas y socioeconómicas.
- **Alcantarillado Combinado:** Es un sistema que conduce, evacúa y permite el drenaje simultáneo de aguas residuales y aguas lluvia.

De acuerdo con la EAAB (2006), la Figura 3-8 esquematiza la disposición de las conexiones de servicios públicos de acueducto, alcantarillado sanitario y alcantarillado pluvial en un predio esquemático.

Figura 3-8: Esquema de disposición de servicios públicos de acueducto y alcantarillado en un predio. (EAAB, 2006).



Según las anteriores definiciones, el sistema primordial de estudio para el caso de las inundaciones urbanas en Bogotá será el sistema de alcantarillado pluvial, el cual es descrito por López (1995), así: "...el alcantarillado de aguas lluvias está conformado por el conjunto de colectores y canales necesarios para evacuar la escorrentía superficial producida por la lluvia. Inicialmente el agua se capta a través de los sumideros en las calles y las conexiones domiciliarias, y se lleva a una red de tuberías que van ampliando su sección a medida que aumenta el área de drenaje. Posteriormente, estos colectores se hacen muy grandes y entregan su caudal a una serie de canales de aguas lluvias, los que harán la entrega a un receptor final, como un río, un lago, un embalse o el mar".

De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial y lo definido por la EAAB ESP, la gestión de los sistemas de alcantarillado de Bogotá D.C. están ordenados en siete (7) cuencas inmersas en el área urbanizable de la ciudad: Torca, Conejera, Tintal, Salitre, Jaboque, Fucha y Tunjuelo (Tabla 3-1). Según la EAAB (2006), "...la cobertura de alcantarillado pluvial es de 93% debiéndose aún expandir redes en algunas zonas sur-occidentales y noroccidentales de la ciudad, entre otras, zonas a las que confluye por configuración topográfica el drenaje natural de la ciudad".

Tabla 3-1: Sistema de alcantarillado sanitario y pluvial de Bogotá. (EAAB, 2006).

SISTEMA POR CUENCA DE DRENAJE		INFRAESTRUCTURA EXISTENTE	DESCARGA ACTUAL
Salitre	Sistema Sanitario	Interceptores derecho e izquierdo de los canales Salitre, Río Negro, Los Molinos, Contador, Callejas, del Norte, Córdoba, Britalia y del Cedro, Interceptor Río Nuevo, Interceptor Río Bogotá-Torca Salitre	Descarga Planta Salitre
	Eje del sistema Pluvial: Canal Salitre	Canales afluentes: Río Negro, El Arzobispo, Los Molinos, Contador, Callejas, del Norte y Córdoba	Entrega al cauce natural del R. Salitre Descarga final R. Bogotá
Jaboque	Sistema Sanitario	Colector de San Marcos, (Cuenca alta del Jaboque) Estación de bombeo de Villa Gladys (confluyen interceptores existentes de la zona baja) con Colector de Descarga	Descarga al sistema Salitre Entrega directa al río Bogotá
	Sistema Pluvial	Canal Jaboque	Descarga al humedal del Jaboque y de allí al río Bogotá
Fucha	Sistema Sanitario	Interceptores derecho e izquierdo a los canales: Fucha, Comuneros, Boyacá, Río Seco, Albina, San Francisco y San Blas, Interceptor del Sur, interceptor Kennedy, Interceptor Fontibón. Interceptores combinados: Calle 22, El Ejido, San Agustín, San Francisco	La Cuenca del Fucha actualmente descarga las aguas residuales al río Fucha inmediatamente aguas abajo de la Avenida Boyacá
	Sistema pluvial	Canal de San Francisco y canal del Río Fucha	Descargan al cauce natural del Río Fucha
Tunjuelo	Eje del Sistema Sanitario: Río Tunjuelo	Red Troncal Sistema Sanitario: Interceptores Tunjuelo Medio-primer etapa, Comuneros – Lorenzo Alcatrúz y Limas. Estación de bombeo El Gran colombiano a R. Tunjuelo	Descarga actual a R. Tunjuelo
	Sistema Pluvial	Río Tunjuelo, Quebrada Chiguaza, Canales San Carlos, San Vicente I y II. Sistema de amortiguación de crecientes insuficiente (cuencas altas rural y urbana hasta San Benito)	Descarga al río Tunjuelo
Tintal	Sistema Sanitario	Colectores, Interceptor oriental Canal Cundinamarca y estaciones de bombeo de Saucedal, Patio Bonito y Tintalito	Descarga R. Bogotá.
	Sistema Pluvial	Canal Cundinamarca Estación Elevadora Gibraltar	Descarga a R. Bogotá
Conejera	Sistema Sanitario	No cuenta con sistema troncal de drenaje sanitario Existe el Interceptor Río Bogotá que recoge las aguas residuales del sector que son conducidas a la planta de tratamiento el Salitre	
	Sistema Pluvial	No cuenta con sistema troncal de drenaje pluvial. Actualmente Q. La Salitrosa y Humedal de la Conejera	Río Bogotá
Torca	Sistema Principal de Drenaje Sanitario	Interceptores derecho e izquierdo del Canal del Cedro.	Descarga al Canal Torca y R. Bogotá.
	Sistema Pluvial	Canal del Cedro (Eje); Canales San Cristóbal y Serrezuela.	Entrega al cauce de la quebrada Torca, para posterior entrega al río Bogotá

La ciudad a 2012 cuenta con una única planta de tratamiento de aguas residuales, la PTAR Salitre, capaz de tratar 4 m³/s. Dicha capacidad es ampliamente superada por la producción de aguas residuales de la ciudad, estimada en 17 m³/s, lo que genera ineficiencia en el funcionamiento del sistema e impactos ambientales negativos (Rodríguez *et ál.*, 2008). El río Bogotá es el único cuerpo receptor del sistema de drenaje de la ciudad. En dicha corriente desembocan los ríos urbanos, parte de las descargas directas sin tratamiento del alcantarillado de la ciudad y de los municipios e industrias de aguas arriba, y lo tratado en la PTAR Salitre. La capacidad de asimilación del río, es decir aquellas características físicas, químicas y biológicas que tiene para afrontar los efectos de los contaminantes vertidos, junto con las mencionadas descargas, generan un deterioro notable en la calidad del agua de los ríos de la ciudad y en su efluente, llegando a condiciones anaerobias a su paso por Bogotá D.C. (*ibíd.*).

3.8 Tipos de metodologías y modelos empleados en la evaluación del riesgo

En la actualidad existen diversos tipos de metodologías de análisis del riesgo público identificadas por el FOPAE (2009), entre las cuales se encuentran las cualitativas, cuantitativas y semicuantitativas. En general, estos tipos de metodologías se caracterizan por:

- **Cualitativas:**

Su objetivo es establecer los riesgos desde su origen, su estructura y manifestación. Los componentes del riesgo potencial, amenaza y vulnerabilidad, son estimados subjetivamente por expertos y se asignan rangos de intensidad para llegar a niveles de amenaza y riesgo en términos cualitativos.

- **Semicuantitativas:**

Su objetivo es establecer el riesgo mediante una combinación de factores y escalas globales, los cuales provienen de los juicios de expertos y de casos que ya hayan ocurrido, similares al que se estudie.

- **Cuantitativas:**

Su objetivo es hacer una evaluación completa de la evolución probable de los componentes del riesgo desde su origen, considerando los posibles escenarios de desarrollo. Se llega a una valoración cuantificable de la amenaza en términos de intensidad y probabilidad de ocurrencia, la vulnerabilidad en porcentaje de daño y el riesgo en términos de pérdidas o afectaciones esperadas en unidades monetarias y/o personas.

La Tabla 3-2 resume las ventajas y desventajas que presentan los tipos de metodologías de análisis del riesgo.

Tabla 3-2: Tipos de estudios para análisis / evaluación de riesgos. (FOPAE, 2009).

TIPOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS	OBSERVACIONES
Cuantitativos	*Rigurosa aproximación científica	*De difícil comprensión por personal no técnico	Utiliza fundamentalmente lógica matemática estadística de frecuencia y cálculo matemático estadístico de frecuencia y cálculo de probabilidades, modelos probabilísticos y determinísticos
	*Comúnmente aceptados por la industria	*Alto costo	
	*Utiliza toda la información histórica disponible o de experiencia	*De difícil manejo en la globalización del riesgo	
	*Ofrece números prácticos	*Puede crear la idea de altísimo conocimiento sobre el riesgo	
Semicuantitativos	*Flexible	*Requiere de muy buena documentación sobre clasificaciones asignadas	Se basa en la utilización de índices globales
	*Utiliza toda la información histórica o de experiencia disponible	*Subjetiva en varios aportes	
	Aprovechamiento de juicios expertos		
	Útil en conclusiones comparativas entre procesos		
Cualitativos	*De bajo costo	*Completamente subjetivo	Su objetivo principal es identificar el riesgo
	*Fácil comprensión	*Límitado análisis de factores	
	*Se basa en un análisis lógico simple	*De difícil documentación en las calificaciones asignadas	
	*Útil como base para estudios semicuantitativos	*Muy simple para enfrentar una decisión	

Por consiguiente, cada uno de estos tipos de metodologías se emplea de acuerdo con los objetivos que se desean cumplir y, según adquieren complejidad, requieren para su correcta aplicación una cantidad mayor de información verídica.

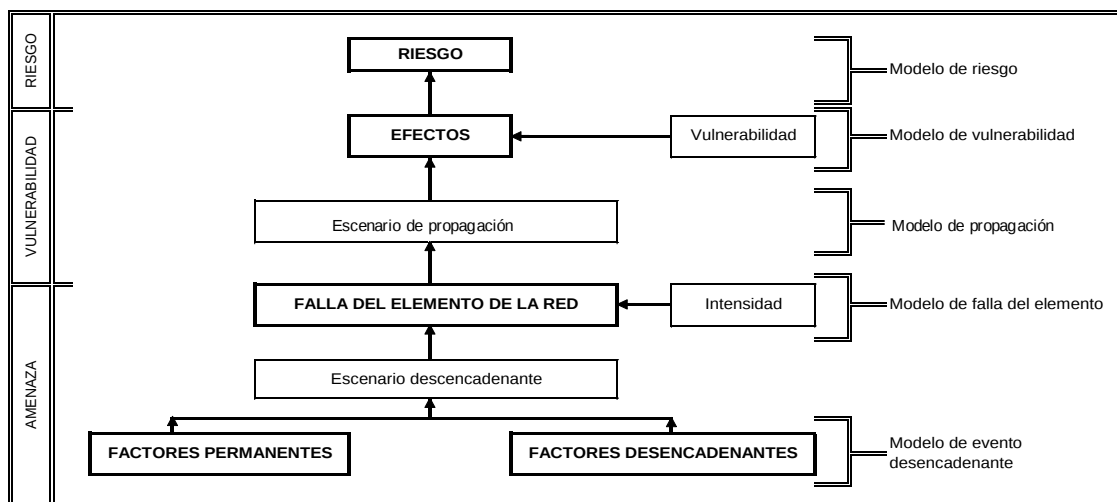
Según el tipo de metodología elegida se desarrollan técnicas de evaluación del riesgo (Tabla 3-3) las cuales pueden ser combinadas para obtener una aproximación más realista del problema, para lo cual se requiere una clara comprensión del riesgo a evaluar. Estas técnicas de evaluación se aplican el análisis de los factores del riesgo, dependiendo del tipo y calidad de la información existente.

Tabla 3-3: Técnicas de evaluación del riesgo. (FOPAE, 2009).

TIPOS	TECNICAS
Cualitativos	*Análisis históricos de eventos *Análisis preliminar de riesgos (PHA) *Análisis ¿QUÉ PASA SI? (what if?) *Análisis mediante listas de chequeo (Check list) *Análisis de operaciones peligrosas (HAZOP) *Análisis de herramientas informáticas (HAZEC/HAZOP) *Matrices mediante árboles de falla (FTA) *Análisis de modo de falla (AMFE/FMEA) *Análisis mediante árboles de eventos amenazantes
Semicuantitativos	*Análisis por modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC/FMAC) *Métodos DOW *Métodos índices de MOND *Método UCSIP (Union Chambres Syndicales Industrie Pétrol, Francia) *Análisis semicuantitativo de causas, amenazas y consecuencias *Método de indexamiento (juicio de expertos)
Cuantitativos	*Análisis cuantitativos mediante árboles de falla (ACFTA) *Análisis cuantitativos mediante árboles de sucesos *Análisis cuantitativos de causas, amenazas y consecuencias *Método de indexamiento (juicio de expertos) *Análisis cuantitativo de árboles de sucesos *Análisis semicuantitativo de causas, amenazas y consecuencias *Análisis cuantitativo de causas, amenazas, consecuencias, vulnerabilidad *Programas de modelación/simulación *Modelos determinísticos y probabilísticos

3.9 Protocolo de modelación del riesgo público por inundación en áreas urbanas

Para construir el protocolo de modelación de la metodología conceptual de la presente investigación, se plantea complementar el protocolo de modelación establecido por el FOPAE (2009) (Figura 3-9), en el cual se muestra cómo intervienen los factores clásicos de evaluación del riesgo: amenaza y vulnerabilidad.

Figura 3-9. Protocolo de modelación según la visión clásica del riesgo. (FOPAE, 2009).

Las fases de modelación del FOPAE (2009) involucran los siguientes modelos para la evaluación del riesgo:

- Modelos de evento desencadenante
- Modelos de falla del elemento
- Modelo de propagación de la falla
- Modelo de vulnerabilidad.
- Modelo de riesgo

Según FOPAE (2009) la primera modelación se realiza sobre los eventos desencadenantes de la amenaza, los cuales son las variables del comportamiento de cada factor natural, socio - natural o antrópico. De este modelo es posible obtener las solicitaciones a las cuales será sometido el sistema de drenaje pluvial frente a una determinada amenaza. El paso siguiente consiste en relacionar los efectos de los eventos desencadenantes con los elementos permanentes del sistema de alcantarillado pluvial, lo cual conlleva a identificar los escenarios desencadenantes que producen falla en el sistema. La falla de estos elementos es el segundo proceso a modelar y su producto será el identificar las características de la falla.

Establecida la falla de los elementos del sistema por acción del evento desencadenante, la fase siguiente consiste en modelar la propagación de los efectos de la falla. El producto de esta modelación es la delimitación del área afectada, lo cual generalmente se presenta como el mapa de amenaza. Una vez establecida el área afectada y su nivel de afectación, se procede a establecer los elementos expuestos a la amenaza, es decir los elementos vulnerables. Por lo tanto, el siguiente paso de modelación consiste en evaluar la afectación que pueden sufrir los elementos vulnerables, considerando las características de las afectaciones sobre las personas, estructuras, y sobre la integridad física y funcional del sistema de alcantarillado pluvial. Como producto de esta modelación se obtienen los índices de vulnerabilidad asociados a cada elemento.

Una vez conocidos los elementos vulnerables y los efectos de la propagación de la amenaza, FOPAE (2009) procede con la modelación del riesgo potencial; por tanto, las cinco fases de modelación anteriormente descritas son congruentes con la concepción clásica del riesgo. No obstante, por medio de la presente tesis se desea ahondar en la visión holística del riesgo, la cual involucra no solo la amenaza y la vulnerabilidad, sino también los conceptos de resiliencia y mitigación, en ámbitos tanto físicos como sociales. En consecuencia, es necesario adicionar dos fases a la modelación para establecer el riesgo efectivo. La modelación de la resiliencia consistirá en evaluar la capacidad de recuperación de un elemento vulnerable frente a la acción de la amenaza, considerando que una vez afectado un elemento es susceptible de mantenerse en condición de riesgo. Los productos de la modelación de la resiliencia consistirán en establecer y valorar, por medio de índices, la capacidad de recuperación de los elementos vulnerables. En tanto, la modelación de la mitigación permitirá evaluar las prácticas que pueden llegar a minimizar la afectación de las amenazas sobre los elementos vulnerables.

4 Propuesta metodológica de evaluación del Riesgo Público por Inundación en Áreas Urbanas (RPIU)

En este capítulo se presenta la propuesta metodológica de evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas, la cual considera la falla en el sistema de alcantarillado pluvial o combinado. Como se estableció previamente, en la actualidad Bogotá D.C. no cuenta con una herramienta que permita establecer el riesgo público por inundación desde una visión holística de la problemática, por consiguiente en esta investigación se propone, la construcción de una metodología que permita determinar el riesgo público por inundación en áreas urbanas que involucre la falla en el sistema de alcantarillado pluvial. Tomar como marco conceptual la teoría holística del riesgo para el análisis de las catástrofes y calamidades, amplía necesariamente el campo de análisis, en el que habitualmente sólo se pone énfasis en los aspectos físico-naturales desencadenantes y en la magnitud del daño producido en cada caso.

Como se indicó al final del capítulo anterior, FOPAE (2009) ha establecido una clasificación de los diversos tipos de estudios para la evaluación del riesgo público, dentro de los cuales se haya los de tipo semicuantitativo como la presente metodología, en la cual se emplea la información histórica disponible, utilizando índices compuestos por indicadores reconocidos globalmente.

En este capítulo, inicialmente se plantean los factores comprendidos en la visión holística del riesgo público, sus índices de evaluación y escalas de valoración, definiendo así la metodología que ha de permitir establecer el nivel de riesgo público por inundación en áreas urbanas bajo condiciones de escenarios probables que generan solicitudes al sistema. Una vez planteada la metodología se establece la información base que debe recopilarse para la correcta aplicación de la misma.

4.1 Base metodológica del RPIU

Como lo expresa Sanahua (1999)...”la generación de metodologías que permiten incorporar los enfoques holísticos, son imprescindibles para avanzar en una evaluación del riesgo que nos acerque más al imaginario de quien es sujeto de los mismos: la gente”.

Partiendo de la necesidad de establecer los aspectos medibles del comportamiento de las variables que intervendrán en la metodología, es decir los factores involucrados en el riesgo holístico por inundación en áreas urbanas, se emplea el concepto de indicador. Como lo describe Mondragón (2002) una de las definiciones más utilizadas por diferentes organismos y autores es la que Bauer estableció en 1966⁴: “Los indicadores son estadísticas, series estadísticas o cualquier forma de indicación que nos facilita estudiar dónde estamos y hacia dónde nos dirigimos con respecto a determinados objetivos y metas, así como evaluar acciones específicas y determinar su impacto”.

De acuerdo con Mondragón los indicadores se caracterizan por:

- *Estar inscritos dentro de un marco teórico o conceptual, que les permita asociarse con el evento a modelar.*
- *Ser claros, de fácil comprensión, exactos en cuanto a su metodología de cálculo y sensibles a cambios en el fenómeno a ser medido.*
- *Ser específicos con respecto al objetivo al cual se vinculan, sin embargo no son exclusivos de una acción específica; un indicador puede servir para estimar el impacto de dos o más acciones. Excepcionalmente un indicador proveerá información suficiente para la comprensión de un fenómeno complejo, por lo cual generalmente se requiere un conjunto de indicadores para establecer el efecto global.*
- *Ser explícitos, de tal forma que su nombre sea suficiente para entender si se trata de un valor absoluto o relativo, de una tasa, una razón, etc., así como a qué grupo de población, sector económico o producto se refieren y si la información es global o está desagregada por sexo, edad, años o región geográfica.*
- *Estar disponibles para varios años, con el fin de observar el fenómeno en el tiempo, así como para diferentes regiones o unidades administrativas.*
- *Ser relevantes y oportunos permitiendo establecer metas que se puedan concretar en acciones.*

Por medio del uso de indicadores en la metodología RPIU, se intenta modelar la serie de factores que dan lugar a la evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas. Estos factores estarán representados en muchos casos por indicadores existentes en las bases de datos de entidades de la ciudad de Bogotá D.C., los cuales son conocidos y empleados en el contexto internacional. No obstante la naturaleza compleja de la temática a enfrentar, se proponen los mejores indicadores posibles en relación con la cantidad y calidad de la información consultada. La relación entre cada indicador y el concepto a modelar queda definida en términos de probabilidad y no de certeza (Boudon & Lazarsfeld, 1985), considerando que el valor de ponderación de los indicadores que constituyen los índices se basa en el criterio de expertos y de los conceptos de las instituciones consultadas. En un intento por hacer frente a la subjetividad inherente de la evaluación del riesgo por inundación en áreas urbanas, se

⁴ Para la ampliación del tema de indicadores se recomienda revisar Bauer, R. (1966). Social Indicators, Cambridge, MIT, Press.

destaca el uso de índices dentro de la metodología de evaluación, los cuales son especialmente útiles y adecuados para el análisis de criterios múltiples y la resolución de problemas de decisión (Zonensein *et ál*, 2008). La combinación de varios indicadores constituye un índice, como lo expresan las siguientes definiciones:

- **Indicador:** es una variable que se traduce a otra en el plano empírico; es una medida sustitutiva de información que permite calificar un concepto abstracto. Se mide en porcentajes, tasas y razones para permitir comparaciones.
- **Índice:** es un conjunto de indicadores de dimensiones de una variable o factor.

El planteamiento de índices dentro de la metodología es una manera de combinar la información asociada a los indicadores de naturalezas y significados distintos, y su traducción en un solo valor. Este resultado, deberá ser representativo de una situación real y facilita la caracterización del conjunto de la serie de indicadores. Las propiedades que caracterizan a un índice incluyen (*ibíd.*):

- **Rango:** definido por sus extremos máximos y mínimos, que comprenden todos los valores que el índice puede asumir.
- **Formulación:** la expresión matemática que representa la relación entre el conjunto de indicadores que componen el índice.
- **Constitución:** el conjunto de indicadores que componen el índice.
- **Dominio:** el ámbito espacial (i.e. local, regional, global, etc.) donde el índice es aplicable.

El uso de sistemas de índices constituidos por indicadores como el que se propone en la presente investigación, han sido empleados anteriormente en temáticas relacionadas, e.g. Cardona (2005) empleándolo en estudios de gestión del riesgo. De la experiencia recopilada en el trabajo de Cardona, se ha identificado la pertinencia de emplear un enfoque que involucre sistemas de indicadores el cual, al estar basado en datos, requiere una conceptualización y análisis riguroso, y permite el estudio de cambios y avances de múltiples temáticas.

Figura 4-1. Niveles de agregación de la metodología RPIU.



4.2 Metodología del RPIU

La propuesta metodológica de Riesgo Público por Inundación en Áreas Urbanas RPIU, se desarrolló de acuerdo con los conceptos y propiedades que se exponen a continuación.

4.2.1 Rango del RPIU

En busca de la simplicidad, se determinó que el valor del RPIU sea adimensional y sus valores estarán entre 0.1 y 10, el mínimo y el máximo riesgo, respectivamente. La escala inicia en un valor cercano a cero (0.1) debido a que si el valor del límite inferior fuese cero (0) se asumiría que no existe riesgo y esto no es real, debido a que siempre existirá un nivel de riesgo efectivo por pequeño que éste sea. Es importante destacar que, con el objeto de realizar operaciones matemáticas con los indicadores que componen los índices del RPIU, los cuales son de naturaleza y unidades variadas, éstos deberán ser previamente normalizados según una escala común. De acuerdo con la formulación que se establece a continuación, todos los indicadores tienen que ajustarse a la misma escala, que asume valores entre 0.1 y 10.

4.2.2 Formulación del RPIU

Con el objeto de cuantificar el riesgo efectivo, la formulación debe reflejar las operaciones entre los factores del riesgo holístico descritos en el capítulo 3.2, para establecer una interrelación de los factores entre la magnitud y probabilidad de ocurrencia de un evento amenazante y las posibles afectaciones que sobre los elementos expuestos genere este evento, considerando las acciones que pueden influir en su reducción. En la presente metodología, cada uno de los factores que constituyen el RPIU tienen asociados pesos ponderados con el objeto de establecer su importancia relativa, cuyo límite inferior de la escala de ponderación es 0.1 (i.e. valor de menor riesgo estimado) y el límite superior es 10 (i.e. valor del mayor riesgo estimado). Así la ecuación

(3-3) (Ecuación del riesgo efectivo), en relación a un periodo de exposición t adquiere la siguiente forma:

$$RIU|_t = \left(A_i \times V_\ell \times Rs_\ell \times M \right) |_t \quad (4-1)$$

Donde:

RIU : Índice de Riesgo de Inundación en Áreas Urbanas, cuyo valor adimensional oscila entre 0.1 (i.e. valor de menor riesgo estimado) y 10 (i.e. valor del mayor riesgo estimado).

A_i : Factor de amenaza, el cual involucra la probabilidad de que un suceso con una intensidad mayor o igual a i se presente durante un periodo de exposición t

V_ℓ : Factor de vulnerabilidad, el cual involucra la predisposición intrínseca de un elemento expuesto ℓ , de ser susceptible a sufrir un daño ante la ocurrencia de un suceso con una intensidad i .

Rs_ℓ : Factor de resiliencia el cual involucra el nivel de resiliencia del elemento expuesto ℓ

M : Factor de mitigación, el cual involucra el grado de reducción del riesgo potencial por efecto de las acciones implementadas.

El valor de cada uno de los factores es variable entre 0.1 (i.e. valor menor) y 10 (i.e. valor mayor) y se determina a partir de la suma ponderada de los indicadores que la componen. Su formulación se establece por medio de la siguiente ecuación, con base en la formulación de Zonensein et ál (2008) y González (2010):

$$A_i, V_e, R_s, M = \sum_{i=1}^n I_i^{FP} \cdot p_i^{FP} \quad (4-2)$$

Donde:

I_i^{FP} : Indicador, previamente normalizado, que compone el factor a evaluar y cuyo valor es variable entre 0.1 y 10.

p_i^{FP} : Peso asociado al indicador I_i^{FP} del factor a evaluar, asignado en función a su importancia relativa. Debe cumplir con las siguientes restricciones:

$$\blacksquare \quad 0 \leq p_i^{FP} \leq 1 \quad (4-3)$$

$$\blacksquare \quad \sum_{i=1}^n p_i^{FP} = 1 \quad (4-4)$$

De acuerdo con González (2010), la recomendación general en cuanto al número total de indicadores a evaluar para cada índice es no emplear más de nueve indicadores, debido a que un número mayor puede dificultar la asignación concertada de la ponderación.

4.2.3 Ponderaciones del RPIU

En lo que corresponde a la asignación de los pesos de cada uno de los indicadores que componen los índices, éstos deben ilustrar la importancia de cada uno con respecto a los demás en la determinación de cada índice, debiendo reflejar el conocimiento colectivo de los expertos para definir su valor; de acuerdo con González la ponderación será correcta siempre que cumpla esta meta. Finalmente, para su asignación se propone el empleo del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), una técnica razonable para capturar el criterio, la experiencia y el juicio de expertos (Saaty, 1980). Considerando esta formulación, se requiere optimizar el análisis espacial de la información de indicadores de naturalezas variadas, las cuales son previamente normalizadas y posteriormente asociadas a unidades espaciales, con el fin de generar capas (i.e. shapefile, del formato ESRI empleado en el software ArcGis) que permita procesar la gran cantidad de información. Como lo expresa Sanahua (1999), los “métodos inductivos” emplean los SIG para inducir niveles o índices de riesgo a partir de una combinación de datos específicos, lo cual es apropiado para establecer áreas de riesgo a escalas pequeñas debido a que si se aumenta la resolución, se requiere incorporar más capas y su análisis se vuelve más complejo. En el caso de la presente propuesta metodológica se emplea el método inductivo descrito por Sanahua, en el cual se realiza una combinación de las diferentes capas temáticas por medio del álgebra de mapas, y la capas son generadas a partir de cada uno de los indicadores que componen los índices y factores que permiten establecer el riesgo efectivo RPIU en el software ArcGis. El álgebra de mapas es un

lenguaje computacional para sistemas geográficos basados en celdas, usado para describir el modelamiento cartográfico, el cual establece un grupo de convenciones para el control del procesamiento de datos; las convenciones describen como se especifican las operaciones, los datos sobre las cuales operan y el orden en que las operaciones deben ser procesadas.

4.2.4 Dominio del RPIU

La aplicabilidad del RPIU se limita principalmente por tres factores: la escala geográfica de estudio, la disponibilidad de información con la precisión adecuada a la escala de estudio y la normalización de todos los indicadores a una misma escala.

En primer lugar se recomienda que el estudio se realice a nivel de cuenca hidrográfica, procurando analizar la unidad hidrográfica como un todo, empleando la información más precisa posible. De acuerdo con la estructura del RPIU, la distribución de índices e indicadores permite que la escala geográfica de aplicación esté abierta a diferentes órdenes de nivel urbano, en los cuales se encuentra contenida la cuenca urbanizada (e.g. para el caso de la ciudad de Bogotá: manzana, Unidad de Planeación Zonal (UPZ), Unidad de Gestión de Alcantarillado (UGA), entre otras). Si es posible la adquisición de información a escalas homogéneas y de calidad, la precisión de los resultados estará en función de la normalización de los indicadores empleados; por consiguiente, es recomendable que la normalización y asignación de pesos sean realizados por las personas más idóneas en el tema según la institución que emplee el RPIU como herramienta de apoyo en lo referente a la evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas.

4.3 Evaluación de la Amenaza (A)

El análisis de la amenaza por inundación ha sido históricamente una de las mayores ocupaciones de los investigadores, en busca de determinar el grupo de factores que desencadenan este tipo de afectación. Según lo reportado por ERN – CAPRA (2009), la evaluación de la amenaza asociada con un fenómeno natural se mide en función de la frecuencia de ocurrencia y la severidad medida mediante algún parámetro de intensidad del peligro determinado en una ubicación geográfica específica, por consiguiente, el estudio de la amenaza estará ligado a la frecuencia histórica de los eventos detonantes y su intensidad. En áreas urbanas será posible evaluar la amenaza por inundación desde tres dimensiones (*ibíd*):

- **La amenaza pluvial evaluada por medio del análisis hidrológico:** debida a lluvias intensas o de gran duración, caídas directamente sobre el área afectada. Mediante este análisis se establece la relación entre la precipitación y la escorrentía producida hasta llegar al sistema de drenaje natural o antrópico.
- **La amenaza hidrodinámica evaluada por medio del análisis hidráulico:** mediante la modelación de las crecientes que transitan por los canales a cielo abierto y redes del sistema de alcantarillado que eventualmente sufren fallas funcionales y/o estructurales, presentándose desbordes y salida del agua del sistema.

- **La amenaza en la llanura inundable:** mediante la modelación que permita simular la distribución de la lámina de agua en la llanura de inundación y sus características. Para establecer la influencia del agua dentro de la llanura de inundación se emplean modelos matemáticos los cuales, según recomienda ERN – CAPRA (2009), deberán incluir ecuaciones de flujo en dos direcciones horizontales basadas en ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y de continuidad. Este modelo requiere de la información del flujo desbordado y la topografía detallada de la zona en estudio.

Por consiguiente, el primer objeto de análisis de la amenaza por inundación serán las variables climatológicas, en particular el análisis relacionado con la lluvia y su distribución espacio-temporal en el área de estudio. Posteriormente al análisis de la lluvia y su caracterización en la cuenca de estudio, se ha de proceder con la caracterización de las avenidas torrenciales, por medio del análisis del tránsito de crecientes, debido que la mayor peligrosidad en relación con la amenaza por inundación se presenta cuando las aguas de precipitación acumuladas localmente en sectores altos, fluyen hacia áreas más bajas concentrándose en arroyos, ríos, canales y en los tramos del sistema de alcantarillado pluvial, por lo cual la problemática se traslada, incrementando su peligrosidad hacia aguas abajo. Mediante la modelación hidráulica se espera obtener la respuesta hidráulica más factible de la cuenca, integrando el análisis de la información recopilada del área de estudio y su sistema de alcantarillado, para verificar y predecir teóricamente el comportamiento hidráulico del sistema y las zonas inundables. Una vez realizada la modelación hidráulica se procede a establecer, para cada uno de los periodos de retorno, la respuesta funcional del sistema de alcantarillado pluvial, la delimitación de las áreas inundables y las características del flujo en la planicie inundable (i.e. profundidad, duración y velocidad de la lámina de inundación).

Debido a que el análisis de la amenaza será plenamente definida mediante métodos hidrológicos, hidráulicos y geográficos, no será necesaria su deducción, por lo cual la consecución del nivel de la amenaza por inundación obvia los indicadores, estableciendo por medio de una escala de índices el nivel de amenaza establecido para la zona en función de la altura y de la velocidad de la lámina de agua que representan la peligrosidad de la amenaza. Por otra parte, los análisis de amenaza se realizan a un nivel de resolución variable, de acuerdo con los alcances del estudio, para capturar de manera más precisa las variaciones en la severidad de la amenaza. De acuerdo con las recomendaciones del software Iber, en la modelación hidrodinámica de centros poblados principales se recomienda emplear una dimensión mínima de análisis de la malla de cálculo del orden de 1 a 3 *km*.

4.3.1 Análisis de la amenaza por precipitación pluvial (A_P)

El concepto meteorológico de “precipitación” reúne a la lluvia, el granizo y la nieve, entre otros fenómenos atmosféricos. No obstante, en el presente documento, se hace referencia únicamente a la lluvia como el aspecto meteorológico detonante de la inundación pluvial, en particular las lluvias intensas y no huracanadas, siendo los

siguientes parámetros los de mayor interés en el análisis de las inundaciones en áreas urbanas en nuestro medio, por constituir los eventos más significativos de las regiones tropicales (ERN – CAPRA, 2009):

- Duración de la lluvia.
- Intensidad media de la lluvia.
- Volumen total de la precipitación.
- Frecuencia de eventos.
- Tiempo entre precipitaciones sucesivas.

En relación con las precipitaciones y el cambio climático, el IPCC (2008) establece que: “La intensidad de las precipitaciones aumentará, particularmente en áreas tropicales y de latitudes altas que experimentan aumentos en la precipitación media ...Según las actuales proyecciones, se encuentra que la intensidad y la variabilidad de la precipitación agravarán el riesgo de inundaciones y sequías en el siglo XXI...La frecuencia de episodios de precipitación intensa aumentará, repercutiendo así en el riesgo de inundaciones provocadas por lluvias...”, donde para el caso Colombiano algunos de estos episodios de lluvias intensas actualmente se han relacionado directamente con la fase fría “La Niña” del fenómeno oceánico-atmosférico de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Es de destacar que en igualdad de condiciones meteorológicas, los efectos de las inundaciones pueden ser muy variados dependiendo de los factores morfológicos de la cuenca (ERN – CAPRA, 2009).

Para evaluar los efectos de la precipitación se deben establecer sus características medibles, las cuales son determinadas mediante los parámetros previamente mencionados y adicionalmente será de interés conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia. A continuación se describen los tres análisis que se proponen para caracterizar las lluvias en la cuenca de aplicación, debido a que estos serán uno de los insumos principales para la posterior modelación hidráulica.

▪ **Análisis de series de intensidades máximas (A_P_IM)**

Para establecer este análisis se recomienda seguir la metodología descrita por EAAB & INGETEC (2005), con el objeto de tener un conocimiento de las intensidades máximas históricas:

1. De las tormentas con valores de precipitación media y máxima más altos, se determina la siguiente información:
 - Datos generales: nombre de la estación donde se registró el evento, fecha de registro de la tormenta, y, si es posible, establecer la entidad que registró y procesó la información.
 - Datos de la tormenta: establecer las horas de inicio y terminación de la tormenta; los valores de precipitación en milímetros y tiempo en horas en los puntos de cambio de la pendiente del pluviograma.
2. A partir de estos datos generar la curva de masa de cada una de las tormentas seleccionadas en intervalos de cinco minutos.

3. Para cada curva de masa establecer los valores de intensidades máximas para duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos. Estas se calculan como la relación entre el incremento de precipitación y el tiempo que transcurrió durante ese incremento ($I = \Delta \text{Precipitación} / \Delta \text{Tiempo}$), lo que corresponde a la pendiente de la curva de masa para cierto intervalo de tiempo.
4. Con estos valores se generan las series de intensidades máximas anuales para cada una de las estaciones a analizar, para duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos. Esto se determina estableciendo el valor máximo de la intensidad de cada año de registro.
5. Para cada una de las series de los valores extremos de intensidad se revisan los siguientes parámetros:
 - Valores medios de intensidad: Se calcula el valor promedio de las intensidades máximas de la serie en forma acumulativa, empleando la siguiente formulación:

$$\bar{I}(n) = \frac{\sum_{i=1}^n i}{n} \quad (4-5)$$

Donde n es el número de años de registro e i es la intensidad máxima anual.

- Desviación estándar de la intensidad: Al igual que para el valor medio de intensidad, ésta se calcula de forma acumulativa. De esta manera, para un año específico de la serie, el valor de desviación estándar asociado corresponde a la desviación de los datos de la serie hasta dicho año.
- Coeficiente de variación: Éste se calcula como la relación entre el valor medio de intensidad y la desviación estándar para un año específico de la serie.

▪ **Curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia) (A_P_IDF)**

De acuerdo con ERN – CAPRA (2009) “la cantidad o intensidad, la duración, la frecuencia y la distribución espacial de las precipitaciones es muy variable, razón por la cual ha sido objeto de numerosas investigaciones...”. Para un mismo periodo de retorno, al aumentarse la duración de la lluvia disminuye su intensidad media, la formulación de esta dependencia es empírica y se determina caso por caso, con base en datos observados directamente en el sitio estudiado o en otros sitios vecinos con las mismas características orográficas. Dicha formulación se conoce como la Intensidad-Duración-Frecuencia o Curvas IDF, y serán éstas el resultado del índice de precipitación pluvial y el suministro para la modelación hidráulica posterior. De acuerdo con INGETEC & EAAB (2005), las curvas IDF son aquellas que muestran la intensidad máxima de la lluvia en un lugar específico para diferentes duraciones de lluvia y periodos de retorno. Esta información puede ser presentada bien sea de forma gráfica, tabular, o por medio de una función matemática ajustada a los datos por algún procedimiento como puede ser el de mínimos cuadrados.

Dentro de la presente investigación se han empleado los resultados del procedimiento planteado por INGETEC & EAAB (2005) para el caso de la Sabana de Bogotá, el cual contiene una selección e interpretación de tormentas, análisis de series de intensidades máximas y la generación de curvas IDF para la ciudad de Bogotá D.C. con registros de precipitación actualizados hasta el año 2003 en 68 estaciones. Si bien la actualización de las curvas IDF no se encuentra dentro de los alcances de la presente investigación, se evidencia esta necesidad para futuros estudios. El resumen de la metodología empleada para la obtención de las curvas IDF, en el análisis puntual de tormentas, se extrae y adapta de *ibíd*:

1. A partir de los registros pluviográficos de cada estación se seleccionan las tormentas teniendo en cuenta los siguientes criterios:
 - a) Mínimo 10 tormentas por año y por estación.
 - b) Tormentas de más de 10 *mm* de precipitación e intensidad mayor a 3 *mm / h* con duraciones entre 15 y 360 minutos. Sólo en el caso de no obtener un número mínimo de 10 tormentas por estación por año, se escogen tormentas de menos de 10 *mm* para cumplir con el criterio a).
2. Se generan las curvas de masa a partir de la lectura de los pluviogramas de las tormentas seleccionadas.
3. Para cada tormenta se obtiene el valor de intensidad para duraciones de 15, 30, 60, 90, 120 y 360 minutos y, a partir de estas, se determinan los valores máximos de intensidades para cada duración.
4. Se realiza el análisis de frecuencia de las series anuales de cada una de las estaciones y para las siguientes duraciones: 15, 30, 60, 120 y 360 minutos; obteniendo las intensidades para períodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
5. Por medio del ajuste de mínimos cuadrados se establecen las ecuaciones de las curvas IDF de la forma $I_{Tr} = C_1 (D + X_0)^{C_2}$, donde (*I*) es la intensidad, en *mm / h*, correspondiente a un período de retorno (*Tr*), en años, y a una duración (*D*), en minutos; C_1, C_2, X_0 son parámetros de ajuste adimensionales.

▪ **Curvas PADF (Profundidad – Área – Duración – Frecuencia)**

Según lo indicado por ERN – CAPRA (2009), las curvas PADF corresponden a una representación particular a nivel de cuenca o subcuenca, de las características de las tormentas que se han presentado históricamente. Estas curvas relacionan la precipitación media sobre un área determinada, con la duración y frecuencia de ocurrencia de la tormenta, de manera tal que permiten analizar la distribución espacial de la ocurrencia de valores dados de profundidad de precipitación. Las PADF se construyen a partir de análisis espaciales de curvas IDF sobre diferentes estaciones en una misma cuenca, fijando la duración de las tormentas y la frecuencia de ocurrencia.

▪ Hietograma de diseño

Cuando no es suficiente el dato de la precipitación máxima para una duración y un periodo de retorno determinado, sino que se requiere conocer la evolución del evento hasta llegar a la precipitación máxima y su posterior descenso, es de gran utilidad la elaboración de un hietograma de diseño basado en la curva IDF. Para esto existen varios procedimientos, como el que se emplea en el presente estudio, denominado método de bloques alternos (Chow et al, 1994).

El procedimiento consiste en estimar la duración total de la tormenta y dividirla en incrementos iguales de tiempo, y leer para cada tiempo en la curva IDF los valores de intensidad de precipitación para la frecuencia deseada según el diseño. Posteriormente se transforma la intensidad de la lluvia (e.g. mm/h), en profundidad de lluvia acumulada para ese incremento de tiempo (i.e. mm en el intervalo de tiempo). A partir de estos valores se obtiene por diferencia la profundidad de lluvia para cada intervalo. Finalmente se representa el tiempo en el eje de las abscisas y la profundidad para cada intervalo en las ordenadas, en donde previamente se debe reordenar los valores de lluvia de manera que la máxima profundidad se pone en el periodo central de la tormenta y se van ordenando hacia la derecha y hacia la izquierda de forma alterna las demás profundidades decrecientes de lluvia.

4.3.2 Análisis de la amenaza hidrodinámica (A_H)

Para establecer la amenaza hidrodinámica se recomienda iniciar con un análisis estadístico de los registros de crecientes históricas en la cuenca de estudio con el objeto de establecer los valores pico y su probabilidad de ocurrencia (Moreno & Hernández, 2008). Con estos registros se procede a realizar la modelación del tránsito de crecientes, en este caso en la cuenca urbanizada, lo que le añade aspectos que incrementan la complejidad del análisis del sistema de drenaje, siendo necesaria la modelación del sistema de drenaje urbano.

ERN – CAPRA (2009), clasifica los fenómenos de crecientes más peligrosos en aludes torrenciales y avenidas torrenciales (crecientes súbitas). Los aludes torrenciales, los cuales no se consideran dentro del alcance de la presente investigación, corresponden a flujos extraordinarios con capacidad de arrastrar lodos y detritos en altas proporciones y que son generados por lluvias intensas, deslizamientos de gran magnitud, rotura de represamientos, erupción volcánica, deshielo de nevados o cualquier otro evento detonante de alta potencialidad (*ibíd.*). No obstante, para futuros estudios se identifica un campo de investigación en esta temática en relación con este tipo de flujos transitando dentro del sistema de drenaje urbano, el cual puede llegar a ser muy importante para ciudades expuestas a este tipo de amenaza.

En relación con las avenidas torrenciales, éstas se originan con eventos de lluvias intensas o muy prolongadas y generalmente la problemática desafía la capacidad del sistema de alcantarillado, incrementando súbitamente los niveles en los canales a cielo

abierto y provocando inundaciones fluviales por desborde (i.e. el primer mecanismo de falla generador de inundación, numeral 3.6). Asimismo, se propaga la falla funcional al sistema de alcantarillado presentándose la falla funcional del sistema, la cual se evidencia por la salida del agua del sistema de alcantarillado a través de los pozos y estancándose en las calles, situación denominada “encharcamiento” (i.e. el segundo mecanismo de falla generador de inundación, numeral 3.6).

El presente análisis busca emplear la modelación integrada del sistema de drenaje urbano para transitar la onda de creciente, empleando información topológica detallada del sistema de alcantarillado del área de estudio, para establecer su comportamiento hidráulico ante eventos de precipitación.

▪ **Modelación hidráulica del sistema de drenaje urbano (A_H_MH)**

En la actualidad, hablar de la modelación de sistemas convencionales de drenaje no es apropiado. Investigaciones recientes coinciden en que la visión desintegrada de los componentes del sistema ha llevado a tomar decisiones equivocadas en el manejo de los sistemas de drenaje (Rauch et al., 2002 en González, 2011). Por consiguiente es necesario emplear una modelación integrada que permita involucrar todos los elementos del sistema y sus interacciones.

De este cambio de paradigma nacen los Sistemas de Drenaje Urbanos Sostenibles (SUDS, por sus siglas en inglés), en donde el objetivo es transportar la mínima cantidad posible de agua residual combinada y usar al máximo la capacidad de almacenamiento del sistema, sin desconocer los principios de garantizar la higiene y la prevención de inundaciones, procurando minimizar los impactos ambientales sobre el cuerpo receptor involucrándolo como un elemento del sistema. (Rauch et al., 1998; Schilling et al., 1996, en González, 2011).

No obstante, no existe un modelo que pueda representar hidráulicamente toda la complejidad de las redes de drenaje de alcantarillado, por lo tanto, como lo expresa ERN – CAPRA (2009)...*“el modelador debe tener el criterio necesario para que, con base en las características particulares de su problema y las características de la información con la que cuenta, pueda seleccionar el modelo más adecuado”*. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que el modelo apropiado no siempre es el más complejo, sino el modelo más simple que permita alcanzar los objetivos del estudio (Rauch et al., 2002 en González, 2011). Dentro de la presente investigación, como se mencionó previamente, se requerirá la consecución de la topología del sistema de alcantarillado para establecer su comportamiento hidráulico ante eventos de precipitación. Estos datos se pueden obtener mediante la aplicación de un modelo integrado de drenaje urbano, para lo cual se propone seguir la “Guía HSG para la modelación de sistemas integrados de drenaje urbano” (Muschalla et al., 2008, en González, 2011). Esta guía propone un procedimiento a seguir al implementar un modelo integrado, enfocándose en la identificación y selección de aproximaciones de modelación apropiadas, cuyos pasos se extractan y adaptan de González (2011):

1. **Análisis del sistema:** La implementación de un modelo integrado debe permitir llegar a un mejor entendimiento del sistema, incluyendo la identificación de fallas en el mismo para establecer la necesidad de optimizar su funcionamiento. El estado actual del sistema se determina mediante la revisión de los datos disponibles e inspecciones de campo. El estado del sistema será de utilidad para la identificación de tramos que pueden llegar a ser insuficientes.
2. **Identificación de procesos y criterios:** El segundo paso consiste en un análisis más detallado del sistema en estudio, con el objeto de identificar las posibles causas de las fallas identificadas en el paso anterior. Como resultado del análisis se deben identificar los posibles escenarios a ser modelados.
3. **Datos necesarios para la modelación:** En cuanto a la cantidad y calidad de los datos necesarios para implementar el modelo, mientras más detallado sea el modelo a implementar es necesaria más información para su implementación (Schütze y Alex, 2004). En este paso se debe reducir al máximo la complejidad del modelo, logrando un equilibrio entre los objetivos del estudio y los datos disponibles.
4. **Análisis del modelo y de los datos:** Este paso comprende un análisis detallado de los datos y de la estructura del modelo, con el fin identificar posibles inconsistencias y/o inestabilidades. Si bien siempre existen diferencias entre el modelo y la realidad, el modelador debe reducirlas al máximo, haciendo una estimación preliminar del comportamiento predictivo del modelo. Para esto, se deben realizar corridas preliminares del modelo implementado, buscando identificar anomalías en los resultados obtenidos.
5. **Calibración y validación:** La calibración se define como la determinación de los valores óptimos de los parámetros del modelo, a partir de comparaciones entre los resultados de las simulaciones y datos observados. Para lograr una buena calibración es necesario contar con registros simultáneos de precipitación, caudales y concentraciones (i.e. en el caso de requerir modelar calidad del agua), en diferentes puntos del sistema. Las interfaces entre diferentes subsistemas deben contar con una cantidad suficiente de datos. Dada la complejidad de los modelos integrados, se recomienda usar metodologías de calibración objetivas y evaluar el ajuste con funciones objetivo definidas (Rauch et al., 2002). El proceso de calibración sugerido, propone estimar de manera separada los modelos de cada subsistema, para finalmente calibrar de manera integrada, partiendo de los resultados de la estimación inicial.

Una vez estimados los parámetros óptimos del modelo, se procede a validarlo, usando un conjunto de datos no usado durante el proceso de calibración. El objetivo del proceso de validación es evaluar la capacidad predictiva del modelo. Es importante mencionar que, aún en los casos en los que no sea posible realizar una calibración adecuada del modelo, se pueden realizar análisis cualitativos a partir de los resultados obtenidos. Lo anterior se puede realizar comparando de manera relativa los resultados de diferentes escenarios, con el estado inicial del sistema.

6. **Análisis de escenarios:** Las medidas definidas en el paso 2, deben ser implementadas en el modelo calibrado y validado. Los resultados de los diferentes escenarios simulados deben ser comparados con un estado de referencia, que puede ser definido como el estado actual del sistema. Nuevamente, los resultados de la simulación de los diferentes escenarios deben ser evaluados, para identificar anomalías o inestabilidades (paso 4). Como se mencionó anteriormente, si no es

posible realizar una calibración detallada del modelo, los escenarios simulados deben ser evaluados de manera relativa (i.e. mejora o deterioro del comportamiento del sistema). Sólo cuando se haya obtenido una calibración adecuada, es posible realizar análisis cuantitativos absolutos.

Este proceso ha de ser el empleado para la correcta implementación de un modelo integrado del sistema de drenaje urbano, el cual finaliza con la documentación y presentación de resultados del estudio.

- **Selección del modelo de análisis hidráulico de las redes de alcantarillado para el presente estudio**

Para este objeto, se realizó una revisión de los modelos hidrológicos disponibles empleados previamente en áreas urbanas, evaluando la accesibilidad al software, los componentes del modelo de cantidad y demás consideraciones, siguiendo lo planteado por Jiménez (2008). La selección objetiva en cuanto a disponibilidad de información para la implementación del modelo y las expectativas de la modelación, permitió establecer que el software de uso libre EPA SWMM 5.0 cumple con las expectativas requeridas en la presente aplicación, en la cual se estableció, con la mejor información hidrológica e hidráulica disponible, la respuesta hidráulica de la red de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo”, empleando la respuesta de la capacidad de operación normalizada por tramos como la amenaza hidráulica potencial en el análisis del riesgo.

Para la implementación del modelo en EPA SWMM 5.0 se procedió a ingresar la topología de la red empleando la información disponible más reciente con que cuenta la EAAB (i.e. EAAB & INGEPAVI LTDA, 2011). La utilización del modelo es sencilla y en la página electrónica del software es posible descargar tutoriales que facilitan su aprendizaje. Debido a que es factible que en sistemas de tipo combinado existan alivios, a continuación se realiza una descripción detallada de su ingreso en el software EPA SWMM 5.0.

- **Modelación hidráulica de las estructuras de alivio en EPA SWMM 5.0**

De acuerdo con lo descrito por EAAB & Consorcio Alcantarillado Ltda. (2011), se siguió el siguiente procedimiento para introducir al modelo hidráulico las estructuras de alivio. Existen cuatro posibilidades de introducir una estructura de alivio en EPA SWMM 5.0: con un divisor de caudales, un orificio, un vertedero o mediante una tubería equivalente.

El divisor de caudales se asimila a un vertedero en el cual a partir de un caudal mínimo inicia la derivación de caudal hacia distintas tuberías, utilizando cualquiera de las siguientes opciones de cálculo:

Aplicando la ecuación de un vertedero:

$$Q_{div} = C_w (f H_w)^{1.5} \quad (4-6)$$

Con una relación lineal entre Q máximo y Q mínimo:

$$f = \frac{Q_{in} - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (4-7)$$

Con una tabla en la cual, en función del caudal de entrada, se distribuye el caudal hacia las distintas tuberías de salida, Figura 4-2.

Figura 4-2. Tabla de división de caudal EPA SWMM 5.0. EAAB & Consorcio Alcantarillado Ltda. (2011).

	Inflow (CFS)	Outflow (CFS)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

El orificio puede ser lateral o de fondo, y alternativamente se puede incorporar una compuerta con solapa para evitar el reflujo. La cantidad de caudal a derivar se calcula por medio de la ecuación típica de un orificio.

$$Q = C \cdot A \sqrt{2gH} \quad (4-8)$$

Donde:

Q : Caudal derivado

C : Coeficiente de descarga (0.65)

A : Área del orificio

g : Gravedad ($9.81 \text{ m} / \text{s}^2$)

H : Altura de la lámina de agua respecto al centro del orificio

En el caso de los vertederos se pueden incorporar vertederos transversales, laterales, rectangulares, trapezoidales o en V. El caudal a derivar está determinado por la siguiente ecuación:

$$Q = C.L.H^{3/2} \quad (4-9)$$

Donde:

Q : Caudal derivado

C : Coeficiente de descarga (1.85-2.0)

H : Altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero

Para modelar una estructura de alivio como una tubería equivalente, debe previamente realizarse el cálculo hidráulico de la estructura de alivio, y posteriormente encontrar el diámetro, longitud y rugosidad de la tubería equivalente, es decir que produzca pérdidas similares para un caudal dado.

▪ Cálculo de la capacidad hidráulica de las estructuras de alivio

A partir de la geometría de la estructura de alivio (i.e. vertedero lateral o transversal) y de las tuberías de entrada y salida, se determina para cada caudal de entrada la proporción de caudal que es aliviada hacia el sistema pluvial y qué proporción continúa por la red combinada

▪ Capacidad de la tubería de entrada

En primer lugar se estima el caudal a tubo lleno de la tubería de entrada para lo cual se utiliza la ecuación de Manning:

$$Q = 0.312 \frac{D^{8/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (4-10)$$

Donde:

Q : Caudal a tubo lleno (m^3 / s)

D : Diámetro de la tubería (m)

S : Pendiente de la tubería (m / m)

n : Coeficiente de rugosidad de Manning (0.015 para concreto)

▪ Capacidad de las tuberías de salida

Para analizar la operación de las tuberías a flujo libre se debe calcular el caudal y la velocidad por la tubería a tubo lleno y posteriormente, mediante las relaciones hidráulicas para tuberías circulares, se calcula la profundidad de flujo, velocidad y pérdidas por entrada para un caudal dado.

El caudal a tubo lleno se estima con la ecuación de Manning anteriormente descrita. Para determinar la velocidad se utiliza la ecuación de continuidad:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (4-11)$$

Donde:

Q : Caudal en la tubería m^3 / s

A : Área transversal de la tubería m^2

V : Velocidad del flujo m / s

Las relaciones hidráulicas para estimar la profundidad de flujo y la velocidad para un caudal menor al de tubo lleno se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Relaciones hidráulicas para tuberías circulares. EAAB & Consorcio Alcantarillado Ltda. (2011).

q/Q	v/V	d/D	d^*/D	t/T
0	0	0	0	0
0.01	0.272	0.061	0.041	0.195
0.02	0.327	0.099	0.067	0.273
0.03	0.366	0.126	0.086	0.328
0.04	0.398	0.148	0.102	0.375
0.05	0.426	0.168	0.116	0.415
0.06	0.45	0.185	0.128	0.452
0.07	0.473	0.2	0.14	0.485
0.08	0.495	0.215	0.151	0.515
0.09	0.515	0.228	0.161	0.542

El nivel de agua al inicio de la tubería se calcula utilizando la ecuación de Bernoulli.

$$Nivel = d + \frac{V^2}{2g} + h_e \quad (4-12)$$

$$h_e = k \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4-13)$$

Donde:

$Nivel$: Cota de la lámina de agua en la estructura de alivio

d : Profundidad lámina de agua m

V : Velocidad del flujo m / s

h_e : Pérdidas de energía por entrada

k : Coeficiente de pérdidas por entrada (0.50)

Para calcular la curva de capacidad para flujo a presión hay dos posibilidades: que opere como un orificio de pared gruesa o como una tubería a presión. En el primer caso se aplica la ecuación típica de un orificio, pero el coeficiente de descarga se determina de

acuerdo con la Tabla 4-2. Se debe cumplir que la relación entre la longitud de la tubería e y el diámetro d sea menor o igual a 3, en caso contrario se debe calcular como una tubería a presión, Ecuación 4-8.

Tabla 4-2: Coeficiente de descarga para orificios de pared gruesa. Sotelo, 1997.

a) Tubo corto.							
Para $\theta = 0^\circ$ (Domínguez, Eytelwein y Schurinu).							
$e/d \leq 0.5$	1	1.5	2.0	2.5	3	5	
C_d	0.60	0.75	0.78	0.79	0.80	0.82	0.79
e/d	12	25	36	50	60	75	100
C_d	0.77	0.71	0.68	0.64	0.60	0.59	0.55

Cuando opera como una tubería a presión se emplea la ecuación de Manning en un proceso iterativo, de manera que el caudal entre dos iteraciones consecutivas sea aproximadamente igual.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \sqrt{S_f} \quad (4-14)$$

Donde:

V : Velocidad del flujo m/s

R_h : Radio hidráulico de la tubería m

S : Pendiente de la tubería (m/m)

n : Coeficiente de rugosidad de Manning (0.015 para concreto)

Para el cálculo de las pérdidas por entrada se utiliza un coeficiente de pérdidas de 0.50, y para las pérdidas por fricción un coeficiente de 0.015.

▪ Capacidad del vertedero de alivio

Si el vertedero del alivio es de tipo rectangular se aplica la siguiente ecuación para determinar su capacidad:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot \mu \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (4-15)$$

Donde:

Q : Caudal derivado m^3/s

μ : Coeficiente de descarga (0.60)

L : Longitud del vertedero (m)

H : Altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero

Si el vertedero es tipo lateral se aplica la ecuación de una bocatoma lateral:

$$Q = \varepsilon.C.L.H^{3/2} \quad (4-16)$$

Donde:

Q : Caudal derivado m^3 / s

C : Coeficiente de descarga (0.60)

ε : Coeficiente de longitud del vertedero

L : Longitud del vertedero (m)

H : Altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero

El coeficiente ε es función de la relación entre L y H :

$$\begin{array}{ll} \text{Si} & \frac{L}{H} \leq 0.3 & \varepsilon = 0,7 + \frac{0.185}{L / H} \\ \text{Si} & \frac{L}{H} > 0.3 & \varepsilon = 0,75 + \frac{0.10}{L / H} \end{array}$$

4.3.3 Análisis de la amenaza de inundación en la llanura inundable (A_H)

Según lo expresado por ERN – CAPRA (2009), el resultado principal de un modelo de amenaza de inundación es la delimitación de las áreas factibles de inundación para un determinado periodo de retorno o tasa de excedencia. De acuerdo con las modelaciones previas (i.e. precipitación y sistema integrado de drenaje) y una vez la lámina de agua se encuentra fuera del sistema de alcantarillado ésta empieza a dispersarse por la llanura inundable, en donde la intensidad de la amenaza se mide en términos de la frecuencia de la inundación, duración de la inundación y velocidad del flujo.

Para establecer el área de inundación la literatura reporta tres tipos principales de modelos hidráulicos: Modelos hidrodinámicos físicamente basados, modelos estocásticos y modelos conceptuales. A partir de la información disponible y el alcance del análisis a realizar se selecciona el modelo de inundación, de manera tal que se obtengan los mejores resultados posibles.

En la presente investigación se emplea el software Iber “*Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas*” CEDEX et al (2010), el cual es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. De acuerdo con CEDEX et al (2010), el rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el

flujo de marea en estuarios. El modelo *Iber* consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Tanto las ecuaciones hidrodinámicas, como los modelos de turbulencia y el modelo de transporte de sedimentos, se resuelven en forma integral por el método de volúmenes finitos en una malla no-estructurada. . El modelo *Iber* surge como respuesta al interés mostrado por el CEDEX en disponer de una herramienta que facilite la aplicación de la legislación sectorial vigente en materia de aguas en España, especialmente en los requerimientos derivados de la Directiva Marco del Agua, la Instrucción de Planificación Hidrológica, la Directiva de Inundaciones o el Plan Nacional de Calidad de las Aguas. *Iber* es de uso libre, su descarga, soporte, foros y demás documentos relacionados se pueden acceder por medio de su página en internet, <http://www.iberaula.es/web/index.php>.

4.3.4 Evaluación final de la amenaza (A)

La evaluación final resultará en el mapa de amenaza del área de estudio, por medio del cual será posible identificar las áreas en donde la severidad de la amenaza es mayor, media o baja, sea por efectos pluviales y/o por efectos de desbordes. De acuerdo con Escuder et al (2010), la inundación pluvial puede ser clasificada con cinco niveles de tasas de daño a la población en función de la severidad de la amenaza. La severidad de la inundación se basa en una clasificación que involucra a cuatro variables: profundidad de la lámina de inundación (y), velocidad del flujo (v), el parámetro del vuelco (i.e. producto $v \cdot y$) y el parámetro de deslizamiento (i.e. producto $v^2 \cdot y$), como se muestra en la Tabla 4-3.

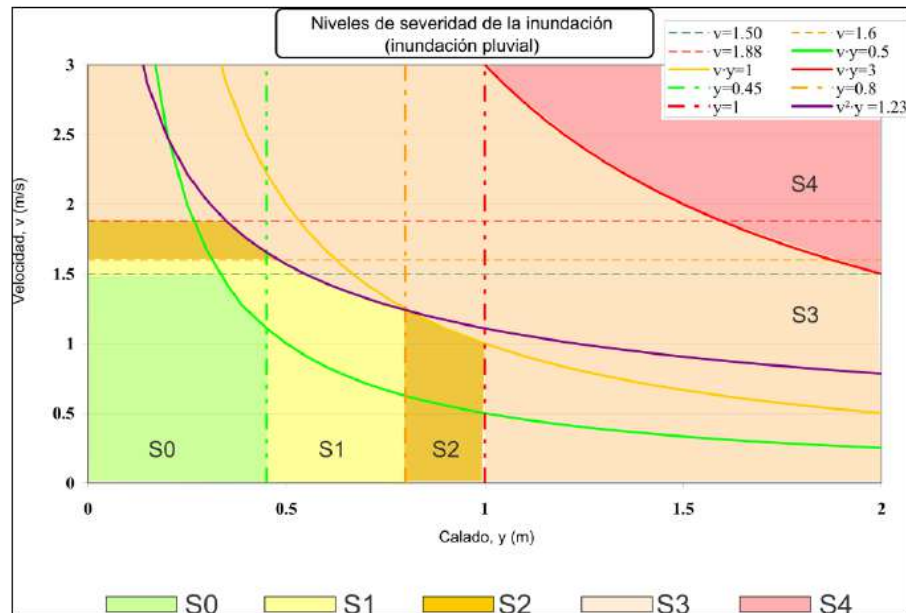
Tabla 4-3. Escala de amenaza desarrollada para la metodología RPIU a partir de la severidad de la inundación desarrollada en el proyecto SUFRI (Escuder et al, 2010).

Escala de amenaza		Nivel de amenaza		Nivel de severidad (S)	Calado $y(m)$	Velocidad $v(m/s)$	Parámetro Vuelco $v \cdot y (m^2/s)$	Parámetro Deslizamiento $v^2 \cdot y (m^3/s^2)$
2		Muy baja	S0	No se esperan víctimas	<0.45	<1.50	<0.50	<1.23
4		Baja	S1	Severidad leve. Peatones pueden sufrir pérdida de estabilidad y dificultades para caminar.	<0.80	<1.60	<1.00	<1.23
6		Media	S2	Severidad media. Significativas pérdidas de estabilidad. Vehículos pierden adherencia.	<1.00	<1.88	<1.00	<1.23
8		Alta	S3	Severidad elevada. Alto riesgo para personas situadas en el exterior. Arrastre de vehículos.	>1.00	>1.88	>1.00	>1.23
10		Muy Alta	S4	Severidad extrema. Daños estructurales a edificios.	>1.00	>1.88	>3.00	>1.23

El establecimiento de estos cinco niveles se fundamenta en criterios existentes relacionados con las condiciones de estabilidad de las personas expuestas al flujo en términos de estabilidad a deslizamiento, arrastre y vuelco (Gómez & Russo, 2009 en

Escuder et al, 2010). La Tabla 4-9 muestra la distribución del nivel de severidad de la inundación pluvial en función del calado y la velocidad del flujo.

Figura 4-3. Gráfico para la obtención de niveles de severidad en inundación pluvial (Escuder et al, 2010).



Para la definición de áreas de amenaza por inundación fluvial o por desborde en la ciudad de Bogotá D.C., se consideraron las zonas presentadas en el Plano Normativo No. 3 del Decreto 619 de 2000 del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), en donde se distingue una escala amplia de tres niveles: amenaza alta, media y baja.

4.4 Índices e indicadores de vulnerabilidad social (VS)

Asumir el carácter reflexivo de los actores de la modernidad desplaza el centro de la atención de la fatalidad hacia la responsabilidad propia, por lo cual se modifica la percepción del problema y los riesgos pasan de ser considerados una situación fatal externa a ser asumidos como responsabilidad de los actores y sus decisiones. En consecuencia, los desastres no pueden considerarse obras divinas, mala fortuna o fatalidad (Barrenechea *et ál*, 2000).

Por consiguiente, el término catástrofe⁵ en el ámbito urbano carece de sentido completo debido a que el medio natural ha sido modificado por acciones antrópicas, por lo cual los desastres ocurridos en las áreas urbanas han de ser considerados como calamidades⁶,

⁵ Catástrofe: Desastre, desgracia o miseria provocado por causas naturales. (Garzón, 2004)

⁶ Calamidad: Desastre, desgracia o miseria que resulta de acciones humanas intencionales. (Garzón, 2004)

en las cuales el ser humano por acción, por omisión, o sin aparente intencionalidad, ha fallado y le corresponden responsabilidades normativas, morales y jurídicas.

El hecho de conceptualizar el riesgo considerando una visión holística que incluye la vulnerabilidad social, permite dar cuenta de otras dimensiones que ayudan a vislumbrar la real complejidad de la problemática del riesgo público de inundación. En abstracción de lo contenido en el numeral 3.3.2, la inclusión de la vulnerabilidad social en la evaluación del riesgo público de inundación establece la capacidad de resistencia de una persona o grupo de éstas, frente a una amenaza específica.

Según la Veeduría Distrital (2002), “El problema de la protección de los grupos vulnerables es planteado por el Artículo 13 de la Constitución Política de Colombia, que establece la igualdad de todas las personas ante la ley y la obligación del Estado de proteger a quienes se encuentran en situaciones de debilidad, para que la igualdad sea real”.

“Todas las personas nacen libres e iguales ante la ley, recibirán la misma protección y trato de las autoridades y gozarán de los mismos derechos, libertades y oportunidades sin ninguna discriminación por razones de sexo, raza, origen nacional o familiar, lengua, religión, opinión política o filosófica. El Estado promoverá las condiciones para que la igualdad sea real y efectiva y adoptará medidas a favor de grupos discriminados o marginados. El Estado protegerá especialmente a aquellas personas que por su condición económica, física o mental, se encuentran en circunstancia de debilidad manifiesta y sancionará los abusos que contra ellas se cometan.”
(Constitución Política de Colombia, 1991: Art. 13.)

De acuerdo con la Veeduría Distrital (2002), “...la vulnerabilidad social y la pobreza son fenómenos sociales que se encuentran a menudo estrechamente relacionados”. No obstante, la vulnerabilidad y la pobreza como conceptos difieren cada uno en su marco conceptual y su metodología de investigación: la pobreza define la falta de medios para asegurar un nivel mínimo de bienestar y, en particular, el acceso a bienes y servicios de carácter esencial; mientras que la vulnerabilidad social se ocupa de los mecanismos y dinámicas sociales que determinan la pérdida de recursos o su consumo insostenible y, por ende, la mayor exposición a una serie de riesgos, como caer en una situación de pobreza.

Otro concepto importante relacionado con la vulnerabilidad social es la exclusión social. De acuerdo con lo expuesto por la Veeduría Distrital, la privación de una capacidad u oportunidad puede representar la imposibilidad de tener o mantener control sobre un activo importante como las relaciones interpersonales, que pueden ser utilizadas en el marco de estrategias de enfrentamiento de diferentes tipos de crisis: desde la enfermedad – mediante el apoyo y el acompañamiento- hasta la crisis económica, –a través de los préstamos y las donaciones-. *“Un posible resultado de una mirada que*

compare exclusión social y vulnerabilidad es que los grupos más vulnerables sean también los más excluidos socialmente” (ibíd.).

Es importante destacar que el tema de la vulnerabilidad social es prácticamente nuevo tanto a nivel nacional como a nivel distrital (*ibíd.*), “*con anterioridad no se han realizado estudios sistemáticos y de amplia cobertura sobre esta variable. Por tanto, no es posible pretender encontrar datos precisos o estudios enfocados al problema*”. Por consiguiente, los indicadores seleccionados en la presente investigación pretenden dar una respuesta efectiva a la verdadera dimensión de la vulnerabilidad social con base en indicadores abordados por la Veeduría Distrital y Barrenechea *et ál* (2000), como resultado de la selección guiada por la conceptualización de múltiples aspectos temáticos de la vulnerabilidad social. Considerando lo anteriormente mencionado, se estableció abordar los siguientes grupos de índices e indicadores para abstraer la vulnerabilidad social.

4.4.1 Índice demográfico (VS_D)

Los indicadores que componen el índice demográfico permiten establecer las principales particularidades demográficas del área de estudio. Según lo reportado por la Veeduría Distrital (2002), la selección de los aspectos demográficos tiene como finalidad establecer una visión de la realidad poblacional en el medio que interactúa con el riesgo. Los indicadores propuestos se ajustan a los descritos previamente por investigadores como Barrenechea *et ál* (2000) y Rodríguez (2000), y se desarrollaron de acuerdo con la disponibilidad, calidad y precisión de la información disponible en las entidades distritales consultadas.

- **Densidad Poblacional (VS_D_DP)**

La densidad de población (también denominada formalmente *población relativa*, para diferenciarla de la *absoluta*) se refiere al número de habitantes de una unidad funcional o administrativa. La formulación para establecer la densidad poblacional es:

$$Densidad\ Poblacional = \frac{Población}{Área} \left(\frac{\# bab}{ha} \right) \quad (4-17)$$

La densidad poblacional sirve al estudio de la vulnerabilidad social en términos de exposición, dada la concentración o dispersión de personas en el territorio frente a la probabilidad de ocurrencia de eventos amenazantes. En este caso, la relación es directa: a mayor densidad de población, mayor vulnerabilidad.

- **Índice de Dependencia Demográfica (VS_D_DD)**

El índice de dependencia demográfica (adimensional) es el resultado del cociente entre la suma de la cantidad de personas en condición de dependencia de niñez (0 a 18 años), dependencia por vejez (60 años en adelante) y personas en situación de discapacidad

física o cognitiva, y la cantidad de personas en edad laboral (18 a 60 años). Por consiguiente, su formulación se establece mediante la siguiente ecuación:

$$IDD = \frac{\sum p_{0-18} + \sum p_{>60} + p_{\text{Discapacidad física o cognitiva}}}{\sum p_{18-60}} \quad (4-18)$$

Donde:

p : Persona encuestada

Los datos para la construcción de este indicador a nivel de UPZ, provienen de las “Proyecciones de Vivienda, Hogares y Población - Bogotá”, consultados mediante el (SDP, 2010) para los años 2005-2015.

De acuerdo con Barrenechea *et ál* (2000), este índice es relevante en el diagnóstico de la vulnerabilidad social debido a que relaciona a los tres grupos etarios principales (niños y jóvenes, adultos y adultos mayores) y permite estimar cuántas personas estarían a cargo de un adulto en caso de una emergencia, por lo cual un mayor valor del índice de dependencia demográfica es inferido como una mayor vulnerabilidad social. No obstante, como lo exponen (*Ibíd.*) y Rodríguez (2000), en estudios en los que se requiere establecer acciones precisas sobre cada grupo etario es recomendable establecer índices de dependencia independientes para cada grupo, respetando las necesidades heterogéneas entre éstos. En el presente caso, la relación es directa: a mayor relación de dependencia de niños, jóvenes y adultos mayores sobre una persona en edad laboral, mayor será su vulnerabilidad ante la responsabilidad de movilizar y proteger mayor cantidad de personas.

▪ Densidad de LEA (VS_D_LEA)

Los Lugares Especiales de Alojamiento (LEA), (e.g. albergues infantiles, asilos de ancianos, conventos, cuarteles, cárceles, entre otros) requerirán atención especial ante la ocurrencia de una emergencia, lo cual hace que el sector en el que se encuentren estos establecimientos requiera priorización en prevención y atención por la cantidad de personas que pueden encontrarse en situación de vulnerabilidad. Para estudios especiales en que el diagnóstico del tipo de personas establecidas en LEA sea requerido, se recomienda realizar trabajos de campo social para evaluar su vulnerabilidad particular ante una situación de riesgo. En este caso, la relación también es directa: a mayor densidad de LEA, potencialmente mayor cantidad de personas que requieren un desplazamiento especial ante un evento amenazante, lo que incrementa su vulnerabilidad. Su formulación se establece mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad LEA} = \frac{\# \text{ Establecimientos LEA}}{\text{Área}} \quad (4-19)$$

▪

▪ Densidad de E&S (VS_D_E&S)

La densidad de establecimientos educativos (i.e. colegios, universidades y demás instituciones de educación) así como de establecimientos prestadores de servicios de salud (i.e. hospitales, clínicas, centros de atención, entre otros), se consideran relevantes al establecer el nivel de vulnerabilidad social en la cuenca de análisis. Aunque este tipo de establecimientos E&S podrían ser fácilmente incluidos en los LEA, no se generalizan debido a que un alto porcentaje de los usuarios no permanecen las 24 horas dentro del establecimiento, siendo la población flotante la más alta. No obstante, la afectación y factible evacuación de los E&S revisten tanta importancia como los LEA, por consiguiente su identificación es primordial para la determinación de los planes de acción ante una factible emergencia. Al igual que en el caso de LEA, la relación también es directa: a mayor densidad de S&E en el área, potencialmente mayor cantidad de personas que requieren un protocolo de desplazamiento especial ante un evento amenazante, por lo cual la identificación de las áreas con S&E permitirá establecer su mayor vulnerabilidad. Su formulación se establece mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad S \& E} = \frac{\# \text{ Establecimientos S \& E}}{\text{Área}} \quad (4-20)$$

4.4.2 Índice de condiciones de vida (VS_CV)

Es de destacar que a nivel mundial, el indicador más comúnmente usado para medir la calidad de vida es el Índice de Desarrollo Humano (IDH), establecido por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), cuyo cálculo se realiza a partir de las siguientes variables:

- Esperanza de vida.
- Educación (en todos los niveles).
- PBN per cápita.

No obstante en ausencia de estimaciones detalladas de estas variables en el contexto urbano (i.e. cuencas hidrográficas urbanizadas), se propone un índice de condiciones de vida que permita establecer, por medio de un conjunto de indicadores, las particularidades de las condiciones de vida de la población y como ésta interactúa con el medio que le rodea mediante el análisis de aspectos en donde se evidencian los desequilibrios sociales en términos espaciales, de distribución de la riqueza y de acceso a los servicios y a las oportunidades.

La pertinencia de la utilización de los siguientes indicadores proviene de lo enunciado por investigadores como Barrenechea *et ál* (2000), y entidades como el DANE, SDH, SDP, que recomiendan abordar los indicadores propuestos por ser reconocidos mundialmente. No obstante, debido a la disponibilidad de datos para construir los indicadores se recomienda emplear los que se proponen a continuación, esperando que alguno de ellos o todos sean de fácil consecución a una escala más detallada, por consiguiente y se

desarrollaron de acuerdo con la disponibilidad, calidad y precisión de datos de las entidades distritales consultadas.

▪ **Índice ICV DANE (VS_CV_ICV)**

El Índice de condiciones de vida ICV, es un índice de evaluación de las condiciones de vida desarrollado por el DANE es un indicador multivariado que considera variables de tipo cualitativo, las cuales, posteriormente, son cuantificadas. Algunas de las características consideradas para su construcción son las características físicas del hogar (i.e. sistema de abastecimiento de agua, recolección de basuras, materiales de pisos y paredes, etc.) y de educación (i.e. escolaridad y asistencia escolar). Este índice puede tomar valores entre 0.1 y 10, en donde valores cada vez más grandes representan mejores condiciones de vida del hogar.

▪ **Personas con Necesidades Básicas Insatisfechas (VS_CV_NBI)**

En relación con lo enunciado por SHD (2005) a través de este indicador se determina si un hogar cuenta con servicios sanitarios básicos, una vivienda aceptable y acceso a la educación. Se considera el método más apropiado para identificar carencias críticas de una población, se emplea indirectamente para identificar la calidad de vida y es útil para identificar algunas condiciones que pueden llevar a la pobreza. Según la definición enunciada por el DANE las Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) se calcula por medio de los siguientes indicadores simples:

- **Hogares con características inadecuadas:** Porcentaje de la población que habitan en viviendas con paredes exteriores de estera, o de quincha, o con piedra, o con barro, o madera, y piso de tierra o improvisada, o en un local no adecuado para la habitación urbana.
- **Hogares hacinados:** Porcentaje de la población que habita en espacios con más de 3 o 4 miembros por habitación.
- **Hogares sin servicio sanitario:** Porcentaje de la población que habita en espacios sin servicio sanitario alguno.
- **Hogares con niños que no asisten a un centro educativo:** Porcentaje de la población en cuyos hogares tienen al menos un niño de 6 a 12 años que no asiste a un centro educativo.
- **Alta dependencia económica:** Porcentaje de la población en hogares con jefe con estudios primarios incompletos (hasta segundo año) y con 4 o más personas por ocupado o, sin ningún miembro ocupado.

De acuerdo con el DANE (2005), cada uno de estos indicadores simples hace referencia a necesidades básicas insatisfechas de diferente tipo, y a partir de ellos se constituye uno compuesto, que clasifica como pobre o con NBI aquellos hogares que estén, al menos, en una de las situaciones de carencia expresada por los indicadores simples y en situación de miseria aquellos hogares que tengan dos o más de los indicadores simples de necesidades básicas insatisfechas. El indicador muestra el porcentaje de las personas u hogares que sufren necesidades y para su implementación aquí, se normaliza entre 0 y 10. En el caso de la evaluación del índice NBI, la relación es directa: a mayor porcentaje

de hogares o personas con una o más carencias identificadas por los indicadores simples del NBI, mayor será la situación de susceptibilidad a eventos amenazantes.

▪ **Grado de concentración del ingreso – Coeficiente de Gini (VS_CV_GINI)**

De acuerdo con SHD (2005), el coeficiente de Gini es un indicador que permite medir la desigualdad del ingreso en una sociedad, especialmente a través del ingreso per cápita familiar. Acorde con lo registrado por Medina (2001), éste es uno de los indicadores sintéticos más utilizados para el análisis estadístico de la desigualdad, debido entre otros motivos, a su facilidad de cálculo y de interpretación. A partir de este indicador se obtiene una apreciación de la diferencia que existe entre la distribución real del ingreso presente en una sociedad y una distribución teórica, en la que el ingreso es distribuido en perfecta igualdad a todos los individuos o grupo de hogares perceptores. El coeficiente de Gini se calcula como una razón de las áreas en el diagrama de la curva de Lorenz⁷ o mediante la Fórmula de Brown, Ecuación (4-21):

$$G = \left| 1 - \sum_{k=1}^{n-1} (X_{k+1} - X_k)(Y_{k+1} - Y_k) \right| \quad (4-21)$$

Donde:

G : Coeficiente de Gini

X : Proporción acumulada de la variable población

Y : Proporción acumulada de la variable ingresos

k : Grupo de análisis

Dicha medición varía en una escala de cero a uno (0-1), siendo el valor de cero (0) la situación ideal en la que todos los individuos o familias de una sociedad obtienen el mismo ingreso y uno (1) el valor al que tiende cuando los ingresos se concentran en unos pocos hogares o individuos. De esta manera los valores próximos a cero dan cuenta de una distribución equitativa del ingreso, mientras que valores próximos a uno evidenciarán una situación de inequidad en la distribución del mismo. En la Tabla 4-4 se presentan los intervalos convencionales de valoración descritos por SHD (2005), y su interpretación; no obstante, para su cálculo dentro de la metodología RPIU éstos se normalizan a una escala entre 0.1 y 10.

⁷ Ver cálculo del Coeficiente de Gini mediante la curva de Lorenz en el capítulo III del documento de Medina (2001).

Tabla 4-4: Intervalos de valoración del Coeficiente de Gini, SHD (2005)

INTERVALO	INTERPRETACIÓN
Valores entre (0 – 0,30)	Los valores obtenidos dentro de este intervalo, son reflejo de una distribución equitativa del ingreso.
Valores entre (0,30 – 0,60)	Se puede hablar de situaciones de desigualdad.
Valores superiores a 0,60	Valores por encima de 0,60 expresan una distribución gravemente inequitativa del ingreso.

▪ Estrato socioeconómico (VS_CV_E)

Los estratos socioeconómicos son una herramienta que utiliza el Estado colombiano (Ley 142 de 1994, artículo 102) para clasificar los inmuebles residenciales de acuerdo con los lineamientos del DANE, el cual tiene en cuenta el nivel de ingreso de los propietarios, la dotación de servicios públicos domiciliarios, la ubicación (urbana, rural) y asentamientos indígenas.

Para el caso de Bogotá D.C., el DANE (2004) establece una metodología especial de estratificación que tiene en cuenta seis estratos en las áreas residenciales. La unidad de observación es el lado de una manzana, y los resultados se establecen por manzanas. La estratificación se emplea para realizar la facturación de los servicios públicos domiciliarios, focalizar programas sociales, y determinar tarifas para el impuesto predial unificado de las viviendas, la contribución por valorización y las curadurías urbanas.

De acuerdo con la estratificación, la relación de vulnerabilidad ante una amenaza es inversa: una menor estratificación de la manzana o del área geográfica urbana, revela una mayor vulnerabilidad social de sus residentes.

4.4.3 Índice de exposición humana (VS_EH)

En el análisis de la vulnerabilidad social es prioritario identificar aquellas situaciones en las cuales las personas pueden resultar más afectadas en el caso de presentarse un evento amenazante. Por medio del índice de exposición humana se intenta establecer, mediante un conjunto de indicadores, la relación existente entre las personas y su exposición a eventos amenazantes de inundación en el área urbana.

▪ Uso del suelo en relación con la actividad humana predominante (VS_EH_US)

El uso del suelo como indicador de la exposición humana es aplicable al considerar que dependiendo de la actividad predominante en la zona, será mayor o menor la capacidad de respuesta de una persona o comunidad frente a un evento amenazante, en función de

la cantidad de personas que potencialmente ocupen estos territorios y las actividades que allí se efectúan.

De acuerdo con el POT 2000, en el área urbana de Bogotá D.C. se presenta una clasificación de veintidós tipos de usos del suelo. La Tabla 4-6 presenta la clasificación de usos del suelo del área urbana de Bogotá D.C., su definición y su valoración, considerando una escala normalizada entre cero y diez (0-10), en donde cero corresponde a un área en donde no se espera la presencia de personas y diez para las áreas en donde factiblemente resultaran afectadas una mayor cantidad de personas por exposición ante un evento amenazante. En este caso, la relación es directa: a mayor densidad de población, mayor exposición.

▪ **Exposición humana al aumento del nivel del agua (VS_EH_NA)**

Según lo reportado por Zonensein et ál (2008), éste indicador es representativo de los daños causados a los seres humanos por el contacto inmediato con el agua de la inundación. La profundidad de la inundación determina si la lámina de agua llega a las calles, a la acera o a invadir el interior de las viviendas y edificaciones. La Tabla 4-5 presenta la normalización de este indicador y la asociación de sus valores originales con otros que varían entre 0.1 y 10. Entre los umbrales establecidos es posible aplicar una interpolación lineal.

Tabla 4-5: Umbrales de normalización de la profundidad de la inundación, adaptado de Zonensein et ál (2008)

Profundidad (cm)	Id	Efecto
<10	0	La lámina de agua se limita a las calles.
50	3	Se produce una inundación que supera las aceras y llega a los parques, patios, estacionamientos, sótanos y el primer piso de las viviendas. Los niños pierden la habilidad de desplazarse por sus propios medios. Se puede interrumpir el tráfico de vehículos y ocurren daños materiales en las viviendas afectadas.
70	6	Las personas pierden habilidad para desplazarse, en particular niños y adultos mayores. La lámina de agua invade el interior de las viviendas, causando daños a su estructura y contenido.
100	9	El agua llega a prácticamente todos los bienes en el interior de las casas. Los niños y los adultos mayores pueden sufrir ahogamiento.
>150	10	Los bienes materiales se consideran perdidos. Esta altura de lámina de agua es suficiente para causar ahogamiento a cualquier persona.

Tabla 4-6: Umbrales de normalización del uso del suelo en Bogotá, AMB (2000,2003, 2004a).

ÁREA DE ACTIVIDAD	ZONA	DEFINICIÓN	RANGO
Central	Centro tradicional y núcleos fundacionales	Suelo del Centro Tradicional de la ciudad y de los núcleos fundacionales de los municipios anexados (Usaquén, Suba, Engativá, Fontibón, Bosa, y Usme), para la localización de actividades que responden a las funciones de carácter central que cumplen dentro del modelo de ordenamiento territorial. Allí conviven usos de vivienda, comercio, servicios, y dotacionales, configurando sectores específicos.	9
	Grandes superficies comerciales	Zonas conformadas por grandes establecimientos existentes, especializados en comercio y servicios de escala metropolitana. Los nuevos establecimientos se incorporan a esta categoría una vez desarrollados.	7.5
Comercio y servicios	Zona de servicios al automóvil	Zonas de servicios relativos al mantenimiento, reparación y suministro de insumos a vehículos.	5
	Zona de comercio aglomerado	Zonas conformadas por establecimientos de comercio y servicios varios, en proceso de consolidación.	5
	Zona de comercio cualificado	Zonas y ejes consolidados de escala metropolitana y urbana, conformados por establecimientos comerciales de ventas al detal.	7.5
	Zona de comercio pesado	Zonas de comercio mayorista y venta de insumos para la industria y materiales de construcción a gran escala.	5
	Zona de servicios empresariales	Zonas para centros de negocios y oficinas de escala metropolitana.	5
	Zona de servicios empresariales e industriales	Zonas para centros de negocios, oficinas de escala metropolitana, e industrias con baja ocupación (industria jardín).	5
	Zona especial de servicios	Sectores de conservación que permiten servicios seleccionados a empresas y personas con baja afluencia de público	5
	Parques urbanos y metropolitanos	Zonas definidas para la provisión de parques públicos.	1
Dotacional	Zona de equipamientos colectivos	Zonas para el desarrollo de instalaciones: educativas, culturales, de salud, de bienestar social y de culto.	8.5
	Zona de equipamientos deportivo y recreativo	Zonas para el desarrollo de instalaciones deportivas y recreativas. Incluye clubes campestres.	2.5
	Zona de servicios urbanos básicos	Zonas definidas para edificaciones e instalaciones de servicios relacionados con: Seguridad ciudadana, defensa y justicia, abastecimiento de alimentos, recintos feriales, cementerios y servicios funerarios, servicios de la administración pública, servicios públicos y de transporte	9
	Minera	Zona de recuperacion morfologica	1
Estructura ecológica principal	Sistema de áreas protegidas	El Sistema de Áreas Protegidas del Distrito Capital (SAP), es el conjunto de espacios con valores singulares para el patrimonio natural del Distrito Capital, la Región o la Nación, cuya conservación resulta imprescindible para el funcionamiento de los ecosistemas, la conservación de la biodiversidad y la evolución de la cultura en el Distrito Capital, las cuales, en beneficio de todos los habitantes, se reservan y se declaran dentro de cualquiera de las categorías enumeradas en el presente Plan. Todas las áreas comprendidas dentro del Sistema de Areas Protegidas del Distrito Capital constituyen suelo de protección.	1
Urbana integral	Zona de servicios e industria	Zonas para centros de negocios, oficinas de escala metropolitana, e industrias con baja ocupación (industria jardín).	5
	Zona industrial	Zonas para centros de negocios, oficinas de escala metropolitana, e industrias con baja ocupación (industria jardín).	5
	Zona multiple	Zonas en las que se permiten una combinación libre de vivienda, comercio y servicios, industria y dotacionales.	8.5
	Zona residencial	Zonas caracterizadas por el uso de vivienda y actividades complementarias. Los usos diferentes de la vivienda no podrán superar el 25 % del área útil del plan parcial	10
Residencial	Zona residencial con actividad economica	Zonas de uso residencial, en las cuales se delimitan las zonas de uso residencial exclusivo y zonas limitadas de comercio y servicios, localizadas en ejes viales, manzanas comerciales o centros cívicos y comerciales, las cuales no pueden ocupar más del 30 % del área bruta del sector normativo.	10
	Zona residencial con comercio y servicios	Zonas residenciales, en las cuales además de tener zonas delimitadas para comercio y servicios en un máximo del 30 % del área bruta del sector normativo, las unidades vivienda pueden albergar - dentro de la propia estructura arquitectónica - usos de comercio y servicios, clasificados como actividad económica limitada.	10
	Zona residencial neta	Zonas de uso exclusivo residencial. Se permite la presencia limitada de comercio y servicios, sin superar el 5% del área bruta del sector normativo, siempre y cuando se localicen en manzanas comerciales, en centros cívicos y comerciales y/o en ejes de borde, que ya tienen presencia de comercio y servicios.	10

▪ Exposición humana a la duración de la inundación (VS_EH_DI)

Según lo reportado por Zonensein *et ál* (2008) este indicador permite evaluar el impacto a largo plazo de las aguas de inundación sobre las personas. Las áreas que permanecen inundadas por períodos largos crean restricciones al tránsito de peatones y vehículos, pueden causar daños en las estructuras, aumentar las posibilidades de enfermedades de origen hídrico o forzar la evacuación de las viviendas. Sin embargo, el daño potencial puede variar siendo los más afectados los peatones, los vehículos incluidos sus ocupantes y las viviendas incluyendo sus habitantes. El indicador de duración considera estos tres posibles grupos de afectación de acuerdo con la gravedad de los daños asociados.

En la formulación desarrollada para la metodología RPIU se considera que t_{10} , t_{30} y t_{50} son los tiempos en minutos, durante los cuales un área urbana permanece inundada con más de 10, 30 y 50 cm de lámina de agua, respectivamente. Estos intervalos y profundidades asociadas son representativos de los efectos de una inundación a los peatones, ocupantes de vehículos y habitantes de edificaciones. Para representar el impacto diferenciado en cada lugar t_{10} , t_{30} y t_{50} tuvieron que ser normalizados por separado, de acuerdo con las escalas específicas, lo que resulta en T_{10} , T_{30} y T_{50} . Finalmente, el resultado de este indicador se estima a partir de la suma ponderada de estos tres últimos valores, tal como se presenta en la ecuación (4-22):

$$DI = 0.20 \times T_{10} + 0.3 \times T_{30} + 0.5 \times T_{50} \quad (4-22)$$

Las ecuaciones (4-23), (4-24) y (4-25) definen la normalización de los componentes

$$T_{10} = Ln(t_{10}) \quad (4-23)$$

$$T_{30} = Ln(t_{30}) \quad (4-24)$$

$$T_{50} = Ln(t_{50}) \quad (4-25)$$

▪ Exposición humana a la velocidad de la inundación (VS_EH_VI)

Según Zonensein *et ál* (2008), el indicador de velocidad de la lámina de agua en la planicie de inundación es representativo de las fuerzas hidrodinámicas que pueden presentarse en el área de estudio. Si bien, las aguas que fluyen a gran velocidad pueden provocar daños menores a las fachadas de las estructuras, y ciertos casos pueden provocar el arrastre de personas, vehículos y grave afectación a edificaciones. Los valores de la velocidad de la inundación mostrados en la Tabla 4-7, se basan en los

límites de estabilidad determinada por estudios empíricos. Así mismo se destacan los criterios descritos por Gómez & Russo (2004), en los cuales se consideran los siguientes límites para la estabilidad de las personas:

$V_{\max} < 1 \text{ m/s}$ Criterio de máxima velocidad (Témez, 1992)

$V^2 \cdot y \leq 1 \text{ m}^3 / \text{s}^2$ Criterio de la estabilidad al deslizamiento (Nanía, 1999)

$V \cdot y \leq 0.45 \text{ m}^2 / \text{s}$ Criterio de la estabilidad al vuelco (SIHH- UPC 2001).

Con base en estos criterios se han establecido los valores de la Tabla 4-7 en relación con el criterio de velocidad de la inundación. Entre estos valores es posible aplicar interpolación lineal.

Tabla 4-7: Efectos de la velocidad de la lámina de agua en la planicie de inundación

V (m/s)	Id	Efecto
<0.1	1	Bajo potencial de daño para los niños
0.25	4	Alto potencial de daño para los niños
0.7	6	Alto potencial de daño para los adultos
1.5	8	Alto potencial de daño para los vehículos y sus ocupantes
2.5	9	Alto potencial de daño para las construcciones ligeras (refugios)
>7	10	Alto potencial de daño para las construcciones pesadas (mampostería)

4.4.4 Evaluación general de la vulnerabilidad social (VS)

Para cada unidad de análisis (en este caso, una manzana) se realiza la valoración de cada uno de los indicadores propuestos. Posteriormente, a través de una operación de mapas que muestran la distribución espacial de los diferentes indicadores, se conforman las capas por índices y el mapa de vulnerabilidad social del área de estudio haciendo uso del álgebra de mapas para el análisis espacial del software ArcGIS.

4.5 Índices e indicadores de vulnerabilidad física del área de estudio (VF)

La vulnerabilidad física reúne aquellas características del territorio en el cual se han localizado asentamientos humanos y cuyas particularidades especifican las deficiencias de su estructura física para afrontar los efectos de las amenazas. Como se mencionó anteriormente, el FOPAE (2009) define la vulnerabilidad física como el grado de pérdida de un elemento o conjunto de elementos bajo riesgo, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada. Por tanto, en este documento se aborda la vulnerabilidad física para referirse a las condiciones y características propias del entorno en que se localizan los elementos que pueden llegar a ser afectados por la amenaza de inundación en áreas urbanas.

En relación con el paisaje urbano se establece la interrelación de tres variables: el relieve, el uso del suelo y la edificación.

En primer lugar, se realiza el estudio del relieve como la abstracción de la condición morfológica del territorio, considerando la geología, la topografía actual y la identificación de las áreas urbanas y los cuerpos de agua.

Posteriormente se analiza el uso del suelo, el cual se constituye como la representación planimétrica de los cambios morfogenéticos del suelo, en donde el hombre establece el destino de las áreas y se conforman nuevas unidades. Este cambio en el uso del suelo desde el punto de vista hidrológico se relaciona con el incremento del porcentaje de impermeabilización y la reducción del agua lluvia en el suelo, en donde las áreas han sido revestidas y la cobertura vegetal removida. Las áreas ubicadas en zonas más bajas que el nivel de drenaje natural evidencian una mayor susceptibilidad a acumular las aguas que rápidamente discurren por las áreas impermeables, configurando zonas con una alta vulnerabilidad.

Por último se analizan las características de las edificaciones del área de estudio, en donde se relacionan una serie de consideraciones estructurales, en donde las edificaciones construidas con mínimos parámetros de diseño estructural y deficientes condiciones de calidad en el proceso constructivo y los materiales empleados, son más vulnerables ante la amenaza de inundación.

4.5.1 Índice asociado al territorio (VF_T)

Las características morfológicas del área de estudio urbanizada han sido alteradas para beneficio humano, por lo cual para conocer sus condiciones actuales se plantean una serie de indicadores relacionados con la nueva configuración del territorio.

- **Geomorfología (VF_T_G)**

En la identificación de las características del territorio se requiere una representación de los tipos de materiales geológicos que afloran en la superficie terrestre; así mismo es de interés establecer las formas iniciales del relieve del área de estudio por medio de un estudio geomorfológico. Por tanto, es indispensable establecer la composición litológica del terreno la cual determina su capacidad de drenaje y erosión, condicionando la capacidad de los cauces abiertos sin revestir para llevar más o menos carga líquida en el momento del desbordamiento.

Es de destacar que por razones de escala no todo lo que se observa en las inspecciones de campo es posible incluirlo en el mapa geomorfológico, por lo cual solo los rasgos predominantes de una determinada magnitud pueden ser incluidos en éste. En este aspecto es importante establecer qué entidades públicas y privadas proveen este tipo de información y la escala en relación con el objeto del estudio.

▪ **Relieve (VF_T_R)**

Dentro de la caracterización de un área intervenida antrópicamente es necesaria la información del relieve actual del terreno. En este aspecto, se deben utilizar los mapas topográficos con las principales características del terreno y demás elementos que lo componen (estructuras, vías y demás puntos de interés). Esto requiere obtener mediciones topográficas de localización y georreferenciación en detalle, que permitan establecer la posición exacta de un punto en términos de latitud, longitud y cota respecto a un nivel adoptado como referencia, el cual, por lo general, corresponde al nivel del mar. De esta forma es posible identificar las antropobarreras que pueden ejercer límites al desplazamiento del agua en una inundación, teniendo en cuenta que una configuración más plana del terreno facilita la expansión de la lámina de agua y los cambios súbitos de pendiente favorecen el aumento de su velocidad y su concentración.

Se recomienda que para aplicaciones a nivel detallado de subcuencas en áreas urbanas se utilicen como mínimo escalas 1:500 o más detalladas, y su levantamiento sea realizado con el objeto de identificar la información detallada del relieve requerida para definir cotas de inundación.

Como anota Mercuri *et ál* (2007), la dirección del flujo está controlada por el relieve, de forma que el flujo superficial depende, entre otros factores, del gradiente de elevación para lo cual se requiere una representación lo más cerca de la realidad del terreno. Por consiguiente, para un nivel de estudio menos preciso (e.g. escala mayor a 1:5000), es posible emplear un Modelo Digital de Elevación MDE (comúnmente llamado DEM por sus siglas en inglés). Un MDE corresponde a un caso particular de un Modelo Digital de Terreno (MDT), el cual es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, en este caso la altura del terreno en relación a un sistema de referencia.

Según lo consignado por Mercuri *et ál* (2007), muchos de los modelos hidrológicos y de calidad de agua deben su incertidumbre a la incapacidad en representar los efectos del terreno sobre los procesos de transporte en forma adecuada, por consiguiente es importante considerar la incertidumbre inherente a un MDE y establecer su precisión en la interpretación y utilización de las predicciones que surgen de modelos hidrológicos. Con relación a la incertidumbre asociada al empleo de un MDE, ésta puede estar asociada inicialmente al procedimiento empleado para su elaboración, el cual se relaciona principalmente con la confiabilidad de la información topográfica digital disponible y empleada en el ensamble del mosaico digital del terreno.

4.5.2 Índice asociado al uso del suelo (VF_US)

En el proceso de urbanización se identifica al suelo como uno de los elementos del relieve que puede resultar más alterado debido a que la capa edáfica original es destruida y reemplazada por otras coberturas, en su gran mayoría impermeables (pavimento, lozas de concreto, adoquines, entre otros). Este proceso dentro de la

hidrología se identifica mediante el Porcentaje de Impermeabilización (IMP), el cual corresponde al porcentaje del área total de la unidad de estudio que se encuentra impermeabilizada. A mayor impermeabilización se acarrearán mayores efectos sobre la red de drenaje pluvial, como los enunciados en el numeral 3.4, lo cual incrementa las solicitudes de la red de drenaje pluvial. En el caso de las superficies permeables (parques, jardines, prados y terrenos cultivados, entre otros) la influencia del drenaje superficial sobre la red de drenaje pluvial se hace casi imperceptible debido a los procesos de retención natural e infiltración, por lo cual el drenaje de la escorrentía hacia la red pluvial se realiza de forma retardada.

En el presente estudio se establecerá el índice de vulnerabilidad física en relación con el uso del suelo en función del porcentaje de impermeabilización asociado a la unidad de estudio por medio de una escala que varía entre cero y diez (0-10), en donde los valores cercanos a cero se asocian a áreas en donde predomina el suelo permeable y valores cercanos a diez (10) aquellas áreas en donde predomina la impermeabilidad. Para el desarrollo de este indicador se emplea la capa de manzana, distinguiendo en cada una de estas, si corresponde a parques o áreas verdes.

4.5.3 Índice de exposición de las edificaciones (VF_EE)

La función de vulnerabilidad física de la vivienda se interpretará por medio de una serie de indicadores que establecen las características de las edificaciones que se encuentran expuestas a la amenaza por inundación.

- **Calidad estructural de las edificaciones (VF_EE_ES)**

De acuerdo con la información suministrada por el DANE (2004), se puede contar con datos a nivel de vivienda o por lado de manzana, según el tamaño de la cabecera municipal, el grado de homogeneidad que se presente entre las construcciones residenciales que la componen y las características del entorno inmediato y de la zona en que éstas se localizan.

Mediante un Censo de Estratificación, se hace un inventario de las características físicas externas de las viviendas, de su entorno inmediato y de su contexto urbanístico. Dicho inventario se realiza por observación directa, es decir, sin hacer preguntas a las personas; por esta razón es diferente a los Censos de Población que realiza el DANE. Mediante este Censo se identifican las características de las viviendas tales como materiales de las fachadas, de las puertas o ventanas, antejardines y garajes; las características del entorno urbano inmediato como el tipo e importancia de las vías de acceso, estado del andén y focos de contaminación, entre otros; y el contexto urbanístico en cuanto a sus características de la zona y servicios públicos, como se expone en la Tabla 4-8. Se destaca que el criterio del entorno urbano hace referencia al tipo de vías y de andenes, por lo cual la importancia de la tipología vial se encuentra contenida en el

presente indicador cuando se aplica con relación a la estratificación de la ciudad de Bogotá D.C.

Tabla 4-8: Factores de análisis del censo de Estratificación Bogotá D.C. DANE (2004)

FACTORES	VARIABLES	UNIDAD DE OBSERVACIÓN	UNIDAD DE ANÁLISIS
Vivienda	•Tamaño del antejardín •Tipo de garaje •Diversidad de fachada •Tipo de techo •Tamaño del frente	Lado de manzana	Manzana
Entorno urbano	•Tipo de vías •Tipo de andenes		
Contexto urbanístico	•Zona de ubicación		

La integridad estructural de la vivienda se correlaciona con los métodos constructivos empleados, en la constitución de su fachada y en la calidad de los materiales empleados; por consiguiente, un estimativo de la calidad de la vivienda se relaciona con el estrato de la edificación. Por medio de este indicador se busca identificar aquellos sectores en los que la vulnerabilidad física se verá intensificada por la presencia de medidas estructurales poco tecnificadas. En este sentido, para un determinado estrato se estima una probabilidad de falla estructural o vulnerabilidad estructural de las edificaciones, siendo los valores cercanos a cero (0) los de mejor resistencia estructural (en el caso de Bogotá estrato 6) y los cercanos a diez (10) los de mayor precariedad estructural (estrato 1). Para el desarrollo de este indicador en la ciudad de Bogotá D.C. se emplea la información de manzanas catastrales del POT 2000.

▪ Exposición de las edificaciones al aumento del nivel del agua (VF_EE_NA)

De acuerdo con lo enunciado por ERN – CAPRA (2000), uno de los parámetros principales para estimar la función de vulnerabilidad estructural de las edificaciones es la profundidad de la lámina de agua de inundación. El incremento del nivel del agua de inundación genera una serie de afectaciones a las edificaciones que dependen principalmente de la calidad estructural de la vivienda. Para estudios a nivel individual de la vivienda se recomienda emplear las funciones de vulnerabilidad física expuestas por ERN – CAPRA (2000) y recopiladas en el software ERN – Vulnerabilidad⁸, en las cuales se requiere identificar tres factores: el material predominante de construcción (e.g.

⁸ Proyecto CAPRA. http://www.ecapra.org/capra_wiki/es_wiki/index.php?title=ERN-Vulnerabilidad. Derechos de Autor y de Propiedad Intelectual reservados (C) 2010 ERN América Latina. Todos los derechos y de Propiedad Intelectual son reservados. Se permite su uso para fines no comerciales registrándose en soporte.capra@itec-ltda.com.

concreto reforzado, mampostería reforzada, madera, acero, entre otros), el método constructivo (e.g. pórtico, diafragma flexible, diafragma rígido, muros estructurales, entre otros) y la altura promedio de pisos de la edificación.

Es de destacar que en lo referente a la evaluación del índice de calidad estructural de las viviendas, el análisis se realiza a nivel de manzana, por lo cual, para la evaluación de los efectos del incremento del nivel del agua de inundación sobre las viviendas se propone una aproximación de las funciones de vulnerabilidad física empleadas por ERN – CAPRA (2000), asociando el estrato socioeconómico de la manzana catastral (según la estratificación reportada por POT 2000) con las características físicas de la vivienda promedio y los efectos esperados según la altura de la lámina de agua.

- **Exposición de las edificaciones frente a los efectos de la velocidad del agua (VF_EE_VA)**

Cuando la inundación en un área se produce por efecto de un flujo torrencial de alta velocidad es necesario adicional a los daños asociados por la altura de la lámina de agua aquellos más fuertes asociados a la velocidad del agua. De acuerdo con lo reportado por ERN – CAPRA (2000), las observaciones recientes permiten establecer que, por lo general, en las áreas de alta velocidad de flujo el daño sobre la infraestructura expuesta es prácticamente total.

De la misma forma que para la resistencia de las edificaciones por la altura del nivel de la lámina de agua de inundación, para el caso de la resistencia de las viviendas por efecto de la velocidad la función de vulnerabilidad está asociada a la calidad estructural de la edificación. A nivel individual se recomienda emplear las funciones de vulnerabilidad física expuestas por ERN – CAPRA (2000) y recopiladas en el software ERN – Vulnerabilidad (ERN, 2010). No obstante, estas funciones no consideran la falta de resistencia por alteraciones del suelo de cimentación ni por socavación, que pueden producir el colapso de la estructura.

4.5.4 Evaluación final de la vulnerabilidad física del área de estudio (VF)

Para cada unidad de análisis se valora cada uno de los indicadores propuestos; y posteriormente, se realiza una operación con base en mapas temáticos de cada uno de los indicadores para conformar las capas de índices y el mapa de vulnerabilidad física del área de estudio haciendo uso del álgebra de mapas para el análisis espacial mediante el software ArcGIS.

4.6 Índices e indicadores de vulnerabilidad funcional y estructural asociados al sistema de alcantarillado pluvial (VAP)

El sistema de recolección y transporte de aguas pluviales de un área urbana involucra elementos lineares y puntuales, entre los cuales se encuentran:

- **Estructuras de captación:** recolectan las aguas a transportar; en los sistemas de alcantarillado pluvial se utilizan sumideros o bocas de tormenta como estructuras de captación, aunque también pueden existir conexiones domiciliarias donde se vierta el agua de lluvia que cae en techos y patios. En los sumideros (ubicados convenientemente en sitios bajos del terreno y a cierta distancia en las calles) se coloca una rejilla o coladera para evitar el ingreso de objetos que obstruyan los conductos.
- **Estructuras de conducción:** transportan las aguas recolectadas por las estructuras de captación hacia sitios de tratamiento o vertido. Representan la parte medular de un sistema de alcantarillado y se forman con conductos cerrados y abiertos conocidos como tuberías y canales, respectivamente.
- **Estructuras de conexión y mantenimiento:** facilitan la conexión y mantenimiento de los conductos que forman la red de alcantarillado, pues además de permitir la conexión de varias tuberías, incluso de diferente diámetro o material, también disponen del espacio suficiente para que una persona baje hasta el nivel de las tuberías y maniobre para llevar a cabo la limpieza e inspección de los conductos.
- **Estructuras de descarga:** son estructuras terminales que protegen y mantienen libre de obstáculos la descarga final del sistema de alcantarillado, pues evitan posibles daños al último tramo de tubería que pueden ser causados por la corriente a donde descarga el sistema o por el propio flujo de salida de la tubería.
- **Instalaciones complementarias:** se considera dentro de este grupo a todas aquellas instalaciones que no necesariamente forman parte de todos los sistemas de alcantarillado, pero que en ciertos casos resultan importantes para su correcto funcionamiento. Entre ellas se tiene a las plantas de bombeo, plantas de tratamiento, estructuras de cruce, sifones, estructuras de alivio, disipadores de energía, etc.
- **Disposición final:** la forma de disposición final de las aguas captadas es un aspecto primordial a definir en las primeras etapas del proyecto del sistema de alcantarillado, cumpliendo con la normatividad de calidad del agua de las descargas al cuerpo receptor.

Como se mencionó en el numeral 3.8, los elementos del sistema de alcantarillado pluvial se consideran potenciales Fuentes Generadoras de Daño (FGD) debido a que una falla del sistema puede incrementar el nivel de riesgo por inundación para los elementos y personas vulnerables que la rodean. Por esta razón es necesario identificar los detonantes de falla que pueden hacer que se incremente la vulnerabilidad estructural y funcional del sistema de alcantarillado pluvial y por consiguiente el riesgo por inundación de las áreas próximas. La Tabla 4-9 y la Tabla 4-10 presentan los principales elementos del sistema de alcantarillado, su factible falla y su efecto estructural y funcional

Tabla 4-9: Identificación y aspectos a evaluar en las fallas del sistema de alcantarillado pluvial. Adaptado de DPAE (2009).

COMPONENTES		ASPECTO A EVALUAR	FALLA
PUNTUALES	Estaciones elevadoras	Posición (Elevadas, enterradas o superficiales)	Obstrucción
			Desplazamiento
			Rotura
	Estructuras de control	Depende del tipo de estructura. Son de interés sus dimensiones, capacidad hidráulica, material	Obstrucción
			Desplazamiento
			Rotura
LINEARES	Redes principales	Diámetro, profundidad y material	Colapso
			Obstrucción
			Desplazamiento
			Rotura
			Explosión
			Rebose (Flujo a presión)

Tabla 4-10: Identificación de fallas, daños y efectos en el sistema de alcantarillado pluvial. Adaptado de DPAE (2009).

FALLA	ELEMENTOS	DAÑOS ESTRUCTURALES	DAÑOS FUNCIONALES	EFFECTOS HUMANOS	EFFECTOS SECUNDARIOS
Rotura	Puntuales	Daño a edificaciones, daño al pavimento, arrastre del entorno.	Pérdida de funcionalidad	SI	Inundación, aumento de la escorrentía, contaminación por las sustancias que salen del sistema de alcantarillado, erosión.
	Lineares		Desconexión	SI	
Rebose	Lineares	Daño a edificaciones, arrastre del entorno, salida a la superficie de lodos del alcantarillado	Pérdida de funcionalidad	SI	
Obstrucción	Puntuales	Daño a edificaciones	Pérdida de funcionalidad	SI	
	Lineares	Daño a edificaciones	Pérdida de funcionalidad	SI	

De acuerdo con González (2011) las redes de alcantarillado transportan, principalmente, tres tipos de sustancias: contaminantes transportados durante tiempo seco (efluentes domésticos e industriales), contaminantes depositados en la superficie de la cuenca y lavados por eventos de precipitación, y contaminantes sedimentados en el sistema de drenaje, resuspendidos debido a aumentos de caudal.

Para el análisis del estado actual y futuro del alcantarillado será de interés la generación de índices e indicadores que involucren los procesos de transporte del alcantarillado "...la acumulación y lavado de contaminantes, el flujo de agua en el sistema, los procesos de transporte de contaminantes (incluyendo sedimentación y resuspensión), y las transformaciones químicas y biológicas". (Rauch et al. (2002) y Schütze et al. (2002), en González (2011)). A continuación se enuncian los índices e indicadores del estado del alcantarillado desde el punto de vista funcional y estructural.

4.6.1 Índice del estado funcional u operacional del alcantarillado pluvial (VAP_EF)

El estado funcional del sistema de alcantarillado pluvial se determina a partir de su modelación matemática hidráulica y del análisis de su funcionamiento en campo. Para el desarrollo de este análisis es de interés conocer:

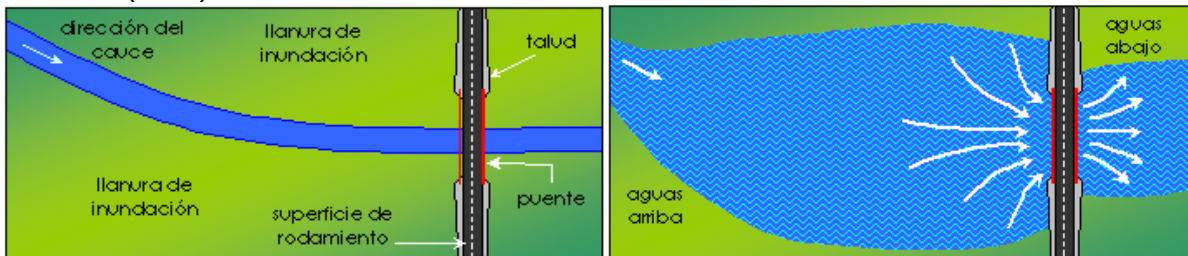
- Localización, dimensiones, material, estado y edad de las tuberías y canales del sistema.
- Localización y profundidad de los pozos de inspección y cotas de las conexiones de las tuberías de la red a los pozos de inspección.
- Disposición y dimensiones de estructuras auxiliares.

Conociendo su estado funcional u operacional, será posible establecer la predisposición de las redes y colectores de sufrir alguna falla de tipo funcional, dentro de las cuales las más frecuentes son las roturas, reboses, obstrucciones, represamientos y desbordes. El síntoma de falla funcional en las tuberías será la entrada en funcionamiento a presión, y en canales el desborde, situación que evidencia un comportamiento hidráulicamente incorrecto dentro del tramo evaluado. A continuación se presentan los indicadores por medio de los cuales se establece el estado funcional del elemento de estudio.

▪ Identificación de antropobarreras (VAP_EF_AB)

Existe una serie de estructuras hidráulicas que son necesarias para dar continuidad a las obras de infraestructura, tanto en áreas urbanas como rurales. Cuando una vía cruza el cauce de un río, se construye generalmente una estructura de control hidráulico (un puente, una alcantarilla, un box culvert, etc.), que permite la continuidad del flujo del agua. No obstante este tipo de estructuras constituyen una constricción, por lo cual, ante condiciones extremas que superen su capacidad de diseño, ésta empezará a generar una sobreelevación y posible desborde. Sin embargo, este tipo de estructuras hidráulicas tradicionalmente no se diseñan como presas y pueden fallar ante esta condición de funcionamiento, siendo sus efectos múltiples y variados tanto para el área ubicada aguas arriba como aguas abajo de la estructura.

Figura 4-4: Efecto de las antropobarreras en cauces ante eventos extremos, ERN-CAPRA (2009).



Cauce en condiciones normales al cruzar un puente

Efecto del represamiento cuando se presenta un caudal extraordinario

Ante una creciente extraordinaria, los niveles aguas arriba de la estructura se incrementan desmesuradamente, el área de afectación por desborde aumenta en área, se producen remansos y se acumulan materiales (empalizadas, sedimentos, residuos)

sólidos, etc.). En el sitio mismo de la estructura, los niveles pueden llegar a alcanzar la capa de rodadura de la vía, afectando su integridad estructural y alterando la movilidad. Aguas abajo de la estructura los efectos tienden a aumentar la peligrosidad de la onda de creciente, la velocidad y severidad de los flujos se incrementan y se acompañan de los materiales previamente retenidos. Por consiguiente, es necesario identificar la cantidad y posición de antropobarreras que alterarían el libre funcionamiento del sistema de alcantarillado, y asignarles un valor de afectación; según el número de antropobarreras en un mismo tramo o elemento a evaluar.

▪ **Sedimentos en el sistema de alcantarillado pluvial (VAP_EF_S)**

Adicional al exceso de caudal líquido, la falla funcional también puede deberse a la presencia de elementos extraños dentro del sistema de alcantarillado. En la presente tesis se hace énfasis en las problemáticas que atañen al sistema de drenaje pluvial separado y combinado, por ser aquellos los que se emplean teóricamente en el control de inundaciones urbanas. Muchas de estas problemáticas proceden de las siguientes fuentes:

- **Fenómeno del Primer Lavado (*First Flush*):** De acuerdo con Duarte (2009), el fenómeno de primer lavado genera altas cargas contaminantes en los sistemas de drenaje urbano. Este efecto consiste en el arrastre de la masa de sólidos y contaminantes acumulados sobre las superficies de una cuenca urbana durante los períodos secos antecedentes a la precipitación. El vertimiento directo de estos contaminantes provoca impactos de consideración en la calidad del agua de las fuentes receptoras urbanas. La magnitud del fenómeno de primer lavado depende de las condiciones específicas de la cuenca aportante y de factores tales como las características morfológicas de la cuenca, el periodo seco antecedente, el área de captación, el uso del suelo, las actividades humanas, la intensidad y la duración del evento de precipitación.
- **Aporte de sedimentos provenientes de la erosión de la cuenca y del depósito atmosférico:** Cuando el uso del suelo en la cuenca se ve marcado por condiciones naturales y actividades que generan una alta erosión y/o el depósito atmosférico es particularmente alto, las concentraciones de estos elementos en el sistema de alcantarillado pueden incrementarse de tal forma que generan taponamientos, los cuales son característicos de los tramos con bajas pendientes. De acuerdo con Díaz Granados & Camacho (2003) en el caso del depósito atmosférico *“Los valores reportados en la literatura no pueden extrapolarse directamente de un lugar a otro, y por lo tanto, se requiere tener conocimiento de las condiciones locales de la polución atmosférica, de los materiales de los techos y de otros factores que pueden afectar procesos de depósito, acumulación, reacción y lavado de contaminantes en los techos”*. Dichos autores establecen que es importante realizar muestreos del depósito atmosférico seco y húmedo y caracterizarlos físico-químicamente en términos de DQO, SS, ST, Al, Cd, Cr, Hg, Pb, Zn, Fe, NO₃, NH₃, NTK, P, Ca, K, Cl, SO₄, con el objeto de realizar análisis e identificar las correlaciones existentes entre el depósito atmosférico y

parámetros como ubicación y uso del suelo, tiempo seco antecedente, duración e intensidad de la lluvia, etc.

- **Zonas en construcción:** La presencia de materiales y escombros de construcción aumenta la concentración de sólidos que factiblemente pueden entrar al sistema de drenaje con el agua escorrentía.
- **Acumulación de grasas:** Las empresas y establecimientos comerciales deben contar con colectores de grasa del tamaño correcto, bien instalados, mantenidos y operando eficazmente, para evitar obstrucciones en las redes del sistema por acumulación de grasas y sustancias similares. Por consiguiente, un factor a analizar en las zonas industriales, de servicios y comercio, será la afectación por la eventual descarga de este tipo de materiales. En ciudades como Nueva York, USA, la sanción máxima por no cumplir con los reglamentos de descargas al alcantarillado actualmente es de \$10,000 por día, por infracción (NYC, 2011).

Si bien el sistema puede transportar estos elementos, su acumulación requerirá de maquinaria pesada para su retiro; por consiguiente, se debe propender por evitar su entrada al sistema, lo cual tiene que ver con la correcta disposición de los residuos sólidos, el adecuado mantenimiento de las redes del sistema de alcantarillado y la identificación con precisión los puntos críticos por falla funcional del sistema por este concepto. La afectación debida a la presencia de estos elementos se evalúa por tramos del sistema, en donde una mayor cantidad de sedimentos afectará la correcta conducción de caudal.

- **Porcentaje de conexiones erradas (VAP_EF_CE)**

En los sistemas de drenaje urbano que se diseñan separadamente (sistema de alcantarillado sanitario aparte del pluvial) deben considerarse los aportes de aguas lluvias al sistema de alcantarillado sanitario provenientes de conexiones incorrectas (e.g. bajantes de tejados y patios). De igual forma, aportes similares se presentan del sistema sanitario al pluvial con la construcción de alivios, los cuales según MinDesarrollo (2000) se deben construir para evitar los reboses del alcantarillado sanitario y evitar problemas de salud pública por saturación del sistema. Sin embargo, por medio del empleo de alivios también se captan los lodos del sistema sanitario y trasladan la problemática al receptor final, el cual generalmente es un río que provee de agua a las poblaciones ubicadas aguas abajo. La presencia de conexiones erradas se debe evaluar por tramos de red, en donde, una mayor cantidad de conexiones erradas resulta en aumentos de los caudales en calidades y cantidades diferentes a las estimadas en el diseño, resultando en afectaciones funcionales de los tramos aguas abajo.

- **Funcionamiento hidráulico del sistema de alcantarillado pluvial (VAP_EF_FH)**

En relación con el funcionamiento hidráulico de las redes de alcantarillado, los conductos cerrados (tuberías, box culvert), es posible establecer cuáles son los tramos en los que se presenta flujo a presión al comparar la cota de salida de la lámina del tramo con respecto al valor del diámetro o dimensión reportado, bien sea mediante modelación

matemática o por inspección mediante piezómetros en el pozo de interés. Si se presenta un nivel que iguala el diámetro de la tubería se sugiere la falla funcional del tramo de análisis por empezar éste a trabajar a presión, considerando que si esta situación se prolonga en el tiempo puede llegar a detonar la saturación del sistema y el agua sale del sistema de alcantarillado, bien sea por alivios hacia un sistema mayor o por medio de los pozos de inspección hacia la superficie.

En el caso de los canales a cielo abierto, es posible evaluar la respuesta hidráulica haciendo seguimiento a los niveles por medio de miras o sensores automáticos. El monitoreo que llevan a cabo las empresas prestadoras del servicio público de acueducto y alcantarillado, han de ser un primer referente para identificar las posibles fallas funcionales ante eventos que superan la capacidad prevista en el diseño y construcción de estos elementos. En Bogotá D.C., de acuerdo con lo reportado por la EAAB (2006), el monitoreo del nivel de los ríos Bogotá, Juan Amarillo, Fucha y Tunjuelo se realizan mediciones que permiten determinar cómo se comporta el río en ciertas estaciones y saber si mantiene una actividad normal o si se encuentra en los niveles de una alerta.

4.6.2 Índice del estado estructural del alcantarillado pluvial (VAP_EE)

La condición estructural del sistema de alcantarillado pluvial se relaciona con las afectaciones producidas sobre la condición física de los elementos que componen el sistema, lo cual es posible caracterizar por medio de un grupo de indicadores que permitan establecer la predisposición de los elementos lineales y no lineales a sufrir algún tipo de falla estructural, dentro de las cuales las más recurrentes son las roturas y los desplazamientos. Entre estos indicadores se encuentran el material y la edad del elemento, los cuales describirán la vida útil remanente teórica del elemento. Para cualquier escenario de análisis, la vida útil remanente teórica (VUR_T), se estima restando a la vida útil teórica del elemento la edad real de servicio del elemento, que corresponde al año del escenario de análisis menos el año de instalación, relación sintetizada en la ecuación (4-26), la cual debe emplearse en un mismo orden de tiempo, en donde generalmente se emplean años:

$$VUR_T = \text{Vida útil teórica del elemento} - (\text{Fecha de análisis} - \text{Fecha de instalación}) \quad (4-26)$$

No obstante, la vida útil remanente efectiva del elemento corresponderá a su vida útil remanente teórica disminuida por un factor de aceleración de detrimento (AD), el cual se estima en función de los años de vida útil que pierde un elemento que se ve afectado por algún tipo de agente físico, químico o biológico. Por consiguiente la formulación de la vida útil remanente efectiva VUR_E será:

$$VUR_E = VAP_EE = (Vida\ útil\ teórica\ del\ elemento - (\text{Fecha de análisis} - \text{Fecha de instalación})) - AD \quad (4-27)$$

En la actualidad la EAAB se encuentra desarrollado un software denominado SIRA (EAAB, 2011), constituido por una base de datos del sistema de las redes de alcantarillado, a partir de las descripciones del estado de 350 Km de red de alcantarillado inspeccionada y calificada de acuerdo con la norma NS-058: “Aspectos técnicos para la inspección de redes y estructuras de alcantarillado”, y de un estimativo realizado por extrapolación del estado estructural actual de los aproximadamente 8000 Km de red existentes en la ciudad de Bogotá, en su mayor parte redes menores, resultante de un análisis estadístico de la información disponible. En cuanto al entorno geográfico, la aplicación SIRA se desarrolla con base en el sistema de información geográfico de la EAAB, en donde se consignan las características de las redes de alcantarillado de la ciudad. Adicionalmente, la herramienta permite la selección de tramos a inspeccionar y la consulta de vídeos de inspección de las redes, además de indicadores y otras características de la red de alcantarillado. Se recomienda su consulta especialmente en los tramos con inspecciones.

Figura 4-5: Entorno de la herramienta SIRA, EAAB (2011b).



De acuerdo con el numeral 3.6 del presente documento, la falla estructural del sistema de alcantarillado pluvial se constituye como el tercer mecanismo de falla generador de inundaciones en áreas urbanas. A continuación se establecen los indicadores por medio de los cuales se puede deducir la posible falla de los elementos del sistema desde el punto de vista estructural.

- **Material del elemento del sistema de alcantarillado pluvial (VAP_EE_M)**

El material de fabricación o construcción de cada uno de los elementos que componen el sistema de alcantarillado, es uno de los indicadores que permite establecer la durabilidad del elemento, lo cual en el caso de las tuberías corresponde a las propiedades para mantener sus funciones hidráulicas y estructurales en el tiempo.

Hasta la fecha no se conoce un material completamente inerte a la acción química de los agentes agresivos, ni totalmente resistente al deterioro físico propio del desgaste a través del tiempo; no obstante existen algunos materiales que mantienen sus propiedades a lo largo de su vida útil. De acuerdo con MinAmbiente (2006), las tuberías y accesorios empleados en los alcantarillados de aguas pluviales deberán “...*resistir la acción química agresiva de las aguas que deben transportar y la de los suelos donde van a ser instalados, debiendo resistir sin daño durante el horizonte de planeamiento para el cual fueron diseñados estos sistemas y durante las pruebas tipo de los ensayos a la resistencia química de que trata el artículo 89 de la presente resolución, con el fin de proteger a los usuarios de un posible efecto negativo sobre la vida, la salud y la seguridad humana, animal, vegetal y el medio ambiente*”. Por su parte, MinDesarrollo (2000) indica que “...*la vida útil de los diferentes componentes de los sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales o pluviales se definen en el literal A.4.9.*”, pero este literal no fue encontrado en el documento de referencia. Asimismo, Tabla D.2.4 a Tabla D.2.6, relaciona las normas técnicas de ICONTEC e internacionales asociadas con tipos de tuberías empleados en los sistemas de alcantarillado colombianos.

La vida útil de un elemento del alcantarillado pluvial puede atribuirse entre otros factores a la durabilidad del material y al hecho de que estos elementos se encuentren generalmente enterrados, lo que implica que la variación térmica es pequeña, no hay exposición atmosférica y los materiales externos próximos a las tuberías no suelen ser agresivos. Al realizar una revisión de los catálogos de tuberías de diferentes materiales, se conformó la Tabla 4-11, en la cual se presentan los tipos de materiales y su vida útil esperada¹⁰.

Tabla 4-11: Vida útil estimada de elementos contruidos en materiales presentes en alcantarillados.

Tipo de elemento	Material de la tubería	Vida útil estimada (años)	Fuente
Conducto	PVC	100	Pavco (Colombia); Gerford (Colombia)
	Concreto reforzado	100	Holcim (Suiza); Tecnitubos (México)
	Polietileno alta densidad	100	Hancor (USA)
	Mampostería	40	Servicio de Impuestos Intenos (Chile)
	Gres vitrificado	80	Steinzeug-Keramo (Alemania)
Pozo o colector	Concreto	50	Servicio de Impuestos Intenos (Chile)
	Mampostería	40	Servicio de Impuestos Intenos (Chile)

⁹ Revisar el Artículo 8: “*Ensayo para evaluar la conformidad con el requisito de resistencia química*”. (Minambiente, 2006).

¹⁰ En el caso de tuberías de concreto se recomienda revisar la publicación de la Asociación Española de Fabricantes de Tubos de Hormigón Armado (ATHA), Capítulo 4, Durabilidad. http://www.atha.es/atha_archivos/inicial.htm

De acuerdo con el material de los elementos a evaluar del alcantarillado pluvial (conductos y pozos) reportados por la EAAB (2009), Tabla 4-11, es posible establecer cuáles redes del alcantarillado pueden llegar a ser más susceptibles a sufrir alteraciones en su estructura debido al deterioro producto del paso del tiempo en condiciones de servicio. No obstante, para evaluar la vida útil remanente teórica del elemento es necesario recurrir al siguiente indicador, siendo su combinación la que produzca el índice de condición estructural teórico.

- **Edad del elemento del sistema de alcantarillado pluvial (VAP_EE_E)**

La edad del elemento es un indicador que permite estimar el remanente de vida útil del elemento, por lo cual la edad se asumirá como el tiempo que el elemento ha permanecido en la red, desde el momento de su instalación hasta el momento de análisis. Por medio de este indicador y combinándolo con el indicador previo, se establece el tiempo de vida residual que teóricamente le queda a cada uno de los elementos evaluados del sistema de alcantarillado pluvial (tuberías y colectores). Este análisis se considera teórico, debido a que se asume que los elementos no han sufrido alteraciones de tipo químico o físico debido a agentes agresivos que aceleren el desgaste.

La información para construir este indicador proviene de la base de datos del sistema de alcantarillado pluvial provista por EAAB (2009). La combinación del presente indicador con el indicador previo, resultará en la vida útil residual teórica del tramo de tubería o del colector de estudio. Su posterior normalización se planteará en términos del porcentaje de vida útil residual teórica, calificándose como más vulnerables aquellos elementos que resulten con una vida útil residual más corta. La identificación de estos elementos como vulnerables puede guiar de forma preliminar las campañas de reconocimiento propias del estudio de diagnóstico de las metodologías de rehabilitación de alcantarillado¹¹, desde un punto de vista estructural.

- **Factor de aceleración de detrimento del elemento del sistema de alcantarillado pluvial (VAP_EE_AD)**

Ocasionalmente se presenta una aceleración en el detrimento de los materiales debido a la presencia de agentes agresivos los cuales pueden llegar a reducir de forma drástica la vida útil estimada de los elementos del sistema de alcantarillado. Un caso de deterioro interno reconocido se debe a la formación de ácido sulfúrico biogénico, situación que se denomina corrosión biogénica, la cual afecta especialmente a las estructuras y tuberías de concreto. En la Figura 4-6 se observa la acción del ácido sulfúrico producido en una red de alcantarillado residual doméstico con 15 años de servicio, en la cual se observa un

¹¹ Ver Rodríguez & Saldarriaga (2006).

lavado del material cementante y la exposición directa de los agregados del concreto, lo que conlleva a una alteración de la integridad estructural del elemento. A pesar de que el tema de agentes agresivos en el sistema de alcantarillado no se encuentra dentro del alcance en la presente investigación, para la óptima aplicación de la metodología se recomienda realizar investigaciones relacionadas con agentes agresivos debidos a la calidad del agua lluvia, calidad del agua de escorrentía, conexiones erradas y calidad del agua combinada, buscando corroborar los años de vida útil remanente efectiva de las estructuras a evaluar por medio del factor (AD) , el cual corresponde a los años de vida útil que pierden los elementos al ser afectados por agentes físicos, químicos o biológicos.

Figura 4-6. Corrosión biogénica de una tubería de concreto en un sistema de alcantarillado residual domestico en Alemania, 15 años de servicio. (Steinzeug-Keramo, 2011)



Nota: http://www.steinzeug.com/CMS/upload/Tubos_de_gres_vetrificado_def_4515.pdf

4.6.3 Evaluación final de la vulnerabilidad funcional y estructural del sistema de alcantarillado pluvial (VAP)

Para el análisis de la vulnerabilidad general del sistema de alcantarillado se construye un mapa (o capa, en este caso empleando la herramienta ArcGIS), en el que verá reflejado el porcentaje de redes de alcantarillado comprometidas debido a su falla estructural actual. Una capa semejante se construye para el caso de la falla funcional. Su combinación identificará los tramos y elementos más vulnerables del sistema.

4.7 Índices e indicadores de resiliencia (Re)

Al hacer una revisión documental acerca de cómo abordar esta temática, la autora se encontró con la siguiente pregunta formulada por Visión Mundial (2011): “¿De qué valen los avances en décadas de desarrollo si un solo evento adverso natural, socio natural o social podría eliminarlo todo de la noche a la mañana?”. La clave de la superación de un evento adverso, reside en la misma conformación social que en parte ha hecho que los seres humanos persistan en este mundo: la organización social. En el momento de estudiar la frecuencia y afectación de las amenazas históricas, en ausencia de registros que permitan su identificación, una buena guía será la memoria colectiva. Incluso ante la ausencia de métodos sofisticados para la generación de alternativas de solución, la evaluación comunitaria es capaz de vislumbrar soluciones acertadas, y aún más, si la evaluación es encabezada por un grupo de expertos.

Como lo plantea Salamanca (2009) “...*mucha gente sabe que vive en áreas inestables... no obstante, los más pobres no tienen el capital necesario para poder vivir en lugares más seguros, entonces están altamente expuestos y buscan a través de medios formales e informales dar solución a los problemas que enfrentan. Por otra parte, se encuentran los que perciben ingresos mayores y de manera individual se reconstituyen. En ambos casos, mientras no sean un grupo de presión, no logran agendar estos temas en la política pública y por lo tanto, sin visibilización por parte del Estado y de la misma población que vive en áreas de alto riesgo, es muy difícil construir comunidades resilientes, por lo tanto, una vez que se produce el desastre, los que cuentan con capitales logran reconstruir y los que son más vulnerables no*”. Por consiguiente, una forma importante de crear resiliencia es a través de la organización comunitaria y la creación de capital social.

La resiliencia de una comunidad con respecto a los posibles eventos que resulten de una amenaza se determina por el grado con que esta comunidad cuenta con los recursos necesarios y es capaz de organizarse tanto antes como durante los momentos apremiantes (ONU, 2009). Es así como la resiliencia social podrá deducirse por medio de un grupo de indicadores que establezcan la capacidad de los grupos sociales para sobreponerse al embate de una amenaza y seguir adelante.

En primer lugar, previo a la formulación de los indicadores de análisis, la autora desea aclarar un aspecto primordial. Las condiciones básicas de salud y nutrición de una persona se relacionan directamente con su capacidad para sobrevivir a trastornos de su sistema de subsistencia, por consiguiente, estas condiciones son importantes para su resiliencia frente a un impacto externo (Blaikie et al, 1996). En este sentido, la capacidad de reacción humana ante un desastre ha sido previamente considerada dentro del análisis de vulnerabilidad social, en donde un valor bajo del índice indicará una menor vulnerabilidad humana y por consiguiente una mayor resiliencia humana de acuerdo con lo planteado por Blaikie et al (1996). Por esta razón, el análisis de la resiliencia intrínseca del individuo ante un desastre no se tratará en el presente numeral, al considerarse que se presentaría una interdependencia paramétrica con lo planteado en el numeral de

vulnerabilidad social (numeral 4.4) y lo ideal es que la metodología sea parsimoniosa y que no se repitan parámetros para valorar dos aspectos relacionados.

Consecuentemente, los aspectos básicos a evaluar en el Índice de resiliencia están basados en aspectos como la organización social, aspectos ambientales, estructurales y financieros. Su planteamiento se presenta a continuación.

4.7.1 Índice de disponibilidad de servicios de atención primaria (Re_SAP)

La densidad de establecimientos dedicados a prestar servicios de emergencia ubicados en las áreas circundantes al área de afectación, serán aquellos que pueden tener una respuesta más rápida y los que estructuralmente se espera resistan el embate de una afectación menor. Bajo esta suposición se asume que estos puntos de atención estarán dispuestos a atender emergencias con suficiencia de personal y elementos que permitan prestar una ayuda efectiva a la comunidad afectada.

En el caso de Bogotá D.C., el Comité Distrital para la Prevención y Atención de Emergencias está conformado por la Secretaría de Gobierno, Salud, Hacienda, Educación, DPAA, EAAB, EEB, Defensa Civil, Bomberos Oficiales, Cruz Roja, DAPD, DAAC, DAMA, ETB, Policía Metropolitana, Ejército Nacional. Su presencia permanente y/o la rapidez en el acceso a la zona de desastre se evalúan dentro del presente índice como un aspecto positivo de resiliencia. Con base en el POT (2000) se analizará la cercanía de los establecimientos de atención primaria al área de estudio y se valorará con mayor resiliencia los elementos urbanos de análisis (en este caso, manzanas) con mayor cantidad y cercanía a entidades prestadoras de servicios de atención primaria.

4.7.2 Índice de asentamientos precarios (Re_PAP)

Se considera que el lograr obtener un predio y construir su propia vivienda constituye no solo su hábitat para una familia, sino que le brinda una mayor capacidad de acción frente al logro de otros objetivos a corto, mediano y largo plazo. Por consiguiente, contar con una vivienda constituye en sí misma una evidencia de la resiliencia y calidad vida. No obstante, como lo recalca Salamanca (2009), en la mayoría de los países latinoamericanos la problemática surge cuando en el mercado libre de tierras, las áreas seguras son capturadas por los grupos económicos fuertes, quedando las áreas inhabitables (i.e. áreas expuestas a deslizamientos, a inundaciones, con riesgo de hundimiento, subsidencia, sin cobertura de servicios básicos, etcétera), las cuales son ocupadas mediante la compra o apropiación del territorio por parte de las familias de escasos recursos, constituyendo uno de los traumas urbanos más perceptibles en América Latina: la urbanización informal en lugares de amenaza alta.

Para establecer los aspectos que se consideran dentro del presente indicador, se adoptan aquellos enunciados por UN-HÁBITAT (2003) para monitorear los Objetivos de

Desarrollo del Milenio adoptados por los estados miembros de la ONU en el año 2000, y particularmente una de las tres metas del Objetivo 7, “*Garantizar la sostenibilidad del medioambiente*”; en efecto, la Meta 11 que establece que: “*Para el año 2020, haber mejorado sustancialmente la vida de por lo menos 100 millones de habitantes de asentamientos precarios*”, en donde se calcula que hasta un tercio de la población urbana del mundo vive en asentamientos precarios.

A este respecto, la Reunión del Grupo de Expertos celebrada en Nairobi, en noviembre de 2002, para “Definir los Asentamientos Precarios y la Tenencia Segura”, recomendó que se emprendiese un monitoreo adecuado de la Meta 11 teniendo en cuenta cinco componentes (indicadores simples), que reflejan las condiciones que caracterizan los asentamientos precarios (UN- HÁBITAT, 2003):

- **Acceso a suministro de agua:** Incluye la proporción de hogares con:
 - Conexión directa (agua corriente) en la vivienda o en el terreno
 - Acceso a un grifo público compartido, como máximo, por dos hogares
 - Acceso a agua de otras fuentes:
 - Pozo surgente
 - Manantial protegido
 - Recolección de agua de lluvia
- **Acceso a alcantarillado:** Incluye la proporción de hogares con:
 - Una conexión privada directa (a la vivienda o al terreno)
 - Al alcantarillado público
 - A un sistema séptico (con capacidad suficiente)
 - Una letrina con descarga, privada o compartida (no pública)
 - Una letrina de pozo mejorada, privada o compartida (no pública)
- **Tenencia segura de la vivienda:** Es el derecho que tienen todas las personas y grupos sociales a la protección efectiva por parte del Estado contra desalojos forzados.
- **Durabilidad de la vivienda:** Una casa considerada “durable”, es aquella construida en un área sin riesgos y con una estructura permanente y lo suficientemente adecuada como para proteger a sus habitantes de inclemencias del tiempo tales como lluvia, calor, frío y humedad.
- **Área de la vivienda:** Se considera que el espacio es suficiente para que convivan máximo tres personas por habitación.

Los datos para la construcción de este índice en la ciudad de Bogotá D.C., provienen de las “Proyecciones de Personas y Vivienda” del censo (DANE, 2005). Los indicadores que se sugiere utilizar en esta propuesta, son:

- **Viviendas con acceso a suministro de agua potable (Re_PAP_AP)**

Para el caso de Bogotá D.C. se establece si se tiene o no el servicio de acueducto según el censo (DANE, 2005), empleando la información a nivel de manzana catastral, sin distinguir si el servicio es provisto por otras fuentes diferentes al servicio que presta la EAAB.

- **Viviendas con acceso a alcantarillado (Re_PAP_AS)**

De igual manera, a partir del censo (DANE, 2005) se establece si se tiene o no el servicio de alcantarillado, según la información a nivel de manzana catastral, sin distinguir si el servicio es provisto por otras fuentes diferentes al servicio que presta la EAAB.

- **Tenencia de la vivienda (Re_PAP_TV)**

El tipo de tenencia de la vivienda se extrae de DANE (2005), empleando el Censo Ampliado a nivel de localidad, en donde es posible determinar el porcentaje habitantes cuyas viviendas son propias, en arriendo, ocupadas, etc. La vivienda propia revela una mayor resiliencia.

- **Durabilidad de la vivienda (Re_PAP_DV)**

Esta se inferirá según el material de los pisos presentes en la vivienda como indicador de los materiales de construcción empleados en la construcción de la vivienda; en donde, para los materiales de mayor calidad se infiere una mayor resiliencia. Se extrae del censo (DANE, 2005), empleando el Censo Ampliado a nivel de localidad.

- **Área suficiente para vivir (Re_PAP_ASH)**

Se establece que en una vivienda se debe disponer de una habitación por cada tres habitantes para no ser considerada en hacinamiento. Por medio del NBI de hacinamiento 2003 y 2007 de la Encuesta de Calidad de Vida (DANE, 2007), se identifican el porcentaje de viviendas de una misma área urbana (manzana) que presentan esta situación.

4.7.3 Índice de capacidad de respuesta ante desastres repetitivos (Re_CDR)

La intensión de este indicador es captar la capacidad de recuperación de un elemento social (una familia, la comunidad de un barrio, entre otros), estructural (edificaciones, redes de servicios públicos, entre otras) ó ambiental (cuerpo de agua, una comunidad biótica, entre otras) tras haber padecido afectaciones previas del mismo origen amenazante (en este caso inundación). En la presente investigación, esta capacidad de recuperación repetitiva propone estimarse en función de:

- **La magnitud de la afectación debida a la amenaza previa (Re_CDR_M)**

Mayormente dirigido a los elementos estructurales, se busca estimar si un elemento fue destruido o afectado totalmente por alguna amenaza previa en cuyo caso requerirá un reemplazo, o si ha sido afectado y aún contiene suficientes características favorables como para ser reconstruido. En el caso de los elementos sociales y ambientales las afectaciones suelen ser tan variadas que requerirán una evaluación detallada que permita la recuperación de su integridad física, emocional y de entorno.

- **Frecuencia de la presencia de la amenaza (Re_CDR_F)**

El cálculo de la frecuencia de la afectación debida a la amenaza dependerá del tipo de elemento a evaluar:

- **Elemento social:** La afectación a estimar estará en función de los efectos producidos por la inundación previa en relación con la cantidad de personas fallecidas, heridas, desaparecidas, desplazadas. Para la consecución de estos datos para Bogotá D.C., cuenta con las bases de datos disponibles en DPAE (2010) y la base de datos de DesInventar (Corporación OSSO, 2011). La escala de consecución del presente indicador se plantea en términos de gravedad de las afectaciones y de la frecuencia con la que se produjo el evento amenazante.
- **Estructural:** Cuando los materiales que conforman una estructura se ven sometidos a esfuerzos de fatiga, debido a repetidas sollicitaciones (como en el caso de las estructuras de pavimentos) o afectaciones (como en el caso de las edificaciones por incrementos prolongados de carga), estos empiezan a deformarse según la curva esfuerzo deformación del material con el cual estén contruidos. El análisis de resiliencia de las edificaciones dependerá de la altura y la velocidad con la cual la lámina de agua golpea a la estructura, siendo importante conocer la frecuencia a la cual la estructura se encuentra sometida a niveles de esfuerzo mayores. Se recomienda realizar el análisis de la resiliencia estructural de las edificaciones o infraestructuras frente a una amenaza específica y repetitiva, para tener certeza del comportamiento de sus elementos.

La valoración de la resiliencia estructural de las edificaciones y de la infraestructura establece que estas perderán de forma porcentual su resistencia estructural ante los efectos de amenazas repetitivas, por lo cual se asume que su vida útil se verá reducida a un valor menor en función de la frecuencia y severidad del evento amenazante previo.

- **Ambiental:** Los cuerpos bióticos establecidos en áreas urbanas tienen particularidades bien definidas y por consiguiente cada uno de ellos son sensibles en diferente medida a los efectos de las inundaciones. Por esta razón, cada ecosistema merece un estudio especial que permita establecer una escala de resiliencia en función de su afectación y frecuencia de los eventos de inundación. En la presente investigación se destacan los humedales, por ser el ecosistema más frecuente dentro de la ciudad de Bogotá D.C. los cuales funcionan como hábitat permanente y transitorio de múltiples especies, además de su valiosa actuación reguladora natural de crecientes y por su capacidad de administración del recurso hídrico. La temática de los humedales como mitigadores de inundación se ampliará más adelante en el índice de mitigación.

De acuerdo con Bó & Malvárez (1999) en sistemas de tipo río-planicie aluvial (dentro del cual se encuentran los humedales), el pulso de inundación es el principal factor responsable de la existencia, productividad e interacciones de la biota predominante. En estos sistemas todos los años se producen uno o más pulsos de agua y sedimentos, afectando la organización de las comunidades naturales (ibíd.). Por consiguiente, gran parte de los componentes bióticos de éstos presentan adaptaciones anatómicas, morfológicas, fisiológicas y/o etológicas que les permiten sobrevivir y reproducirse en dichos sistemas,

pudiendo algunos de ellos, ser más o menos susceptibles de acuerdo al tiempo transcurrido desde el último evento.

En ocasiones, sin embargo, se producen eventos inusuales que presentan características extremas en cuanto a su intensidad, duración y/o distribución (relacionada, esta última, con la proporción de superficie afectada). Dichas inundaciones son consideradas infrecuentes (i.e. considerando una escala de análisis de ciclos temporales cortos) y por lo tanto poco predecibles, provocando consecuencias catastróficas para el ambiente físico y biológico. Este hecho puede determinar una modificación profunda del sistema que lo lleve incluso a otro estado, con la consiguiente desaparición y/o reemplazo de ciertas comunidades bióticas o de algunas de las especies que las constituyen.

Por consiguiente, la escala de resiliencia de un ecosistema como un humedal requiere de un estudio detallado que permita establecer su capacidad de recuperación frente a un evento de magnitud particular. A pesar de que este estudio no se incluye dentro del alcance de la presente investigación, sí se destaca la necesidad de realizar este tipo de investigaciones para los humedales de Bogotá D.C. Para la aplicación de la presente metodología en el área de estudio se establecerá una escala asumida de resiliencia para este ítem.

4.7.4 Índice de transferencia y retención del riesgo financiero (Re_RF)

Cuando se presenta la materialización del riesgo en forma de desastre, éste muchas veces puede no ser afrontado ni sus condiciones previas restituidas por completo por las personas o elementos sociales más vulnerables. Por otro lado, existen sectores de la población para los que su patrimonio no podría ser compensado completamente por ellos mismos debido a que la mayor parte de su capital está invertido en éstos (en el caso de Bogotá D.C. esta situación se presenta en todos los estratos sociales). En cualquiera de los dos casos es probable que los estados de emergencia declarados por el Gobierno no los beneficien debido a que el desastre puede no ser considerado significativo por el Gobierno ó que los mecanismos financieros regulares para la gestión del riesgo sean ejecutados pero no beneficien a todos los afectados debido a la magnitud del desastre, a que existe otro desastre simultáneo, etcétera. De acuerdo con Cardona (2009) los mecanismos financieros más empleados son: los fondos de emergencias, la descentralización presupuestaria, la cofinanciación y la cooperación internacional.

En los Estados Unidos de América las inundaciones son el primer desastre natural a nivel nacional, por lo cual la Agencia Federal para la Gestión de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) desarrolló el Programa Nacional del Seguro contra Inundaciones (NFIP, por sus siglas en inglés). La participación en el NFIP se basa “en un convenio celebrado entre las comunidades locales y el gobierno federal, en el cual se acuerda que si una comunidad adopta y observa una ordenanza para el manejo de tierras susceptibles de inundarse para disminuir los riesgos de inundación, en el futuro en las nuevas

construcciones en las Zonas con Riesgo Especial de Inundación, el gobierno federal se encargará de que la comunidad disponga de un seguro contra inundaciones como protección financiera contra pérdidas ocasionadas por inundaciones”.¹²

Por otra parte, Cardona (2009) destaca que “...en la subregión Andina no se cuenta con mercados financieros bien desarrollados y mucho menos con una cultura de aseguramiento. Esto dificulta la diversificación de riesgos y el uso de mecanismos de mercado para transferir las pérdidas a agentes especializados en la materia”. En relación con el aseguramiento del sector privado, el seguro en la región de América Latina y el Caribe representa actualmente sólo entre el 1.5% y el 2% de las primas de seguros recaudadas a nivel mundial. Como caso especial en nuestro medio se destaca el aseguramiento colectivo voluntario de bienes privados promovido por el gobierno municipal de la ciudad de Manizales, Colombia (ERN-Manizales, 2005).

Es importante recalcar que en relación con la infraestructura pública (infraestructura administrada por el estado y que pertenece a todos los ciudadanos), Cardona (2007) expone que “...el gobierno es responsable de su infraestructura de inmuebles y servicios, por lo cual debe estimar sus pérdidas esperadas o pasivos contingentes y acordar mecanismos o instrumentos de retención consciente y/o transferencia de dichas pérdidas en todos los niveles. Estos instrumentos pueden obedecer a acuerdos entre los diferentes niveles de gobierno, cuando su resiliencia económica así lo permita. En otras palabras, el Estado es responsable de la reconstrucción de los inmuebles públicos o bienes de la colectividad y por lo tanto es tomador de riesgo en nombre de la sociedad”.

Por consiguiente, dentro del presente indicador se asigna un valor mayor de resiliencia a aquellas áreas beneficiadas de forma privada por algún mecanismo de aseguramiento que permita enfrentar la financiación del riesgo o que este haya sido transferido por medio de algún seguro privado. En ausencia de datos de aseguradoras en el área de estudio, se asume que su valor es nulo, aunque algunas aseguradoras ofrecen en Bogotá D.C. el llamado “Seguro contra Terremoto” el cual cubre daños derivados de terremoto, temblor y erupción de volcanes, sustracción con y sin violencia, sobrecargas de energía, incendio, ataques terroristas e impacto de aviones, y cuya póliza de aseguramiento tiene una tarifa promedio de 1,5 y 2 por mil, más IVA anual. (FASECOLDA, 2011).

4.7.5 Evaluación final de la resiliencia (Re)

Mediante la valoración normalizada de los indicadores que se involucran en el análisis de la resiliencia, se plantea un mapa (o capa empleado el programa ArcGIS), el cual resulta valioso para identificar aquellos sectores de la cuenca de estudio en los cuales se requiere priorizar inversión debido a la baja resiliencia presentada.

¹² Ver la página web de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA): <http://www.fema.gov/esp/>

4.8 Índices e indicadores de mitigación (M)

Las acciones de mitigación buscan disminuir los impactos adversos que generan las amenazas sobre los elementos vulnerables. Como lo enuncia ONU (2009)... *“A menudo, no se pueden prevenir en su totalidad los impactos adversos de las amenazas, pero se pueden disminuir considerablemente su escala y severidad mediante diversas estrategias y acciones. Las medidas de mitigación abarcan técnicas de ingeniería y construcciones resistentes a las amenazas, al igual que mejores políticas ambientales y una mayor sensibilización pública”*. En la actualidad las medidas de mitigación van más allá de la acción paliativa sobre los desastres y lo que se busca es intervenir el riesgo potencial para que el riesgo efectivo resulte menor, contribuyendo con la prevención de los desastres, en donde las amenazas se ven disminuidas y los elementos que vulnerables se fortalecen o dejen de estar expuestos.

Las acciones encaminadas a disminuir las afectaciones deberán ser consideradas dentro de un análisis que permita establecer en primera medida si el riesgo es mitigable o no, lo que por lo general se lleva a cabo por medio de un análisis beneficio – costo de la prevención – mitigación. Posteriormente, será de interés evaluar el beneficio de las posibles acciones de mitigación, destacando las medidas asociadas a los SUDS.

4.8.1 Análisis beneficio-costos de la mitigación

De acuerdo con ERN-CAPRA (2009), este análisis debe realizarse dependiendo del tipo y calidad de la información disponible, para lo cual se plantean los siguientes pasos adaptados de *Ibíd* para el caso de inundaciones urbanas:

1. **Especificar la naturaleza del problema:** en el presente caso, la vulnerabilidad de los elementos expuestos a la inundación, sin considerar medidas de mitigación. Este es usualmente el punto de referencia que permitirá establecer que tan benéficas son otras alternativas.
2. **Determinar los costos directos de las medidas de mitigación:** para cada medida de mitigación se debe especificar el costo directo de implementación. Si la financiación se hace por medio de un préstamo, se debe incluir el costo del capital. Las medidas de mitigación deben definirse en términos de costos directos de implementación, y reducción de la vulnerabilidad.
3. **Determinar los beneficios de las medidas de mitigación:** los beneficios esperados por la implementación de determinada medida, dentro de los cuales pueden presentarse: una reducción en el daño de los elementos expuestos, reducción de pérdidas directas e indirecta y reducción en el número de víctimas esperadas.
4. **Comparar la eficiencia de las alternativas de mitigación planteadas:** la eficiencia es calculada por medio de la relación entre el costo de la implementación de la medida y los beneficios asociados a dicha implementación. Se emplea una tasa de descuento representativa que permita convertir los beneficios y costos a valor presente neto (VPN) o relación beneficio-costos (B/C). Se considera que una medida de mitigación es eficaz cuando desde un punto de

vista económico, el VPN es positivo, o de manera equivalente, la B/C es mayor a uno.

5. **Escoger la mejor alternativa de mitigación:** la mejor alternativa entre opciones mutuamente excluyentes, corresponderá a la que presente un mayor VPN, o equivalentemente una mayor B/C.

4.8.2 Planes integrales de mitigación

Para prepararse, prevenir y enfrentarse a las inundaciones se requiere establecer un plan integral de mitigación que defina, según las particularidades de cada cuenca hidrográfica, cuáles serán las acciones que deberán articularse para la solución de la problemática. En este sentido, se requiere identificar el conjunto de medidas que resultarán en una verdadera reducción del riesgo, las cuales según EAAB (2006) pueden clasificarse como:

- **Medidas estructurales (M_E):** Planes de manejo de cuencas que incluyen adecuación hidráulica de cauces, protección de las márgenes y construcción de obras de drenaje de aguas residuales y lluvias, entre otros.
- **Medidas no estructurales (M_NE):** Programas de delimitación y demarcación de rondas hidráulicas y zonas de preservación ambiental, reasentamientos por recuperación de corredores ecológicos, programas de mantenimiento y limpieza de los cauces y sistemas de drenaje, planes de monitoreo y sistemas de alerta, planes de emergencia y contingencia, programas educativos y de divulgación y organización comunitaria, Planes de Ordenamiento Territorial.

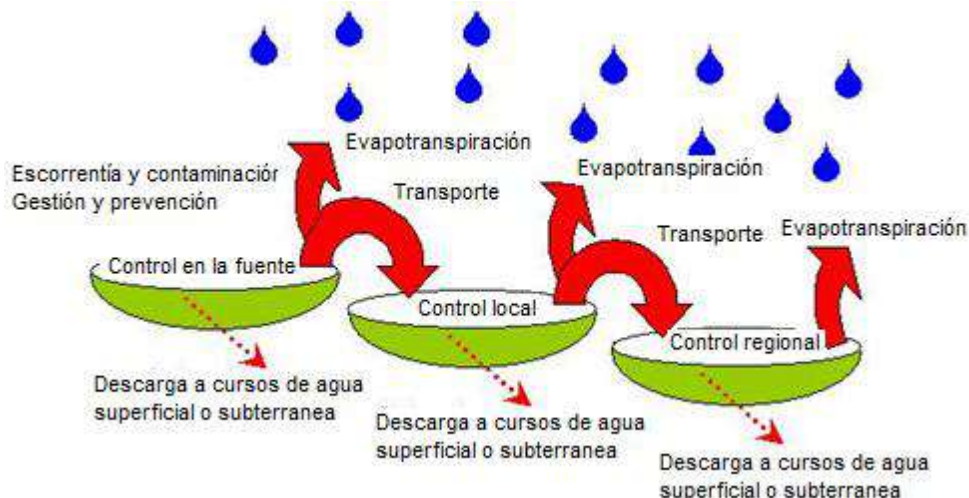
En primer lugar, se identifica que la mayor reducción del riesgo potencial se obtendrá cuando los elementos vulnerables identificados como expuestos dejan de estarlo, por lo cual las medidas más efectivas de mitigación serán aquellas que conducen a establecer en el ordenamiento territorial límites del uso del suelo en función de los riesgos potenciales. No obstante, en la gran mayoría de poblaciones del mundo este es un ideal, posible únicamente para las sociedades que asumen la responsabilidad de establecer la dignidad humana por encima del interés particular. No obstante, se apliquen correctas prácticas de ordenamiento territorial, aun persistirá un riesgo potencial que se traducirá en riesgo efectivo ante la presencia de un evento extremo. Por consiguiente, en un área intervenida antrópicamente como lo son las ciudades, la probabilidad de que el riesgo potencial desencadene desastres es más alto, requiriéndose establecer los mencionados planes de mitigación para que el riesgo efectivo se reduzca.

Como se ha mencionado previamente, el manejo sostenible del drenaje urbano debe asumir un carácter integral, en donde sus mayores representantes son los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS, por sus siglas en inglés). En este sentido se encuentran los también llamados *Best Management Practices* (BMP), *Low Impact Development Urban Water Drainage Systems* (LID), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) y *Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD) (Maksimovic, 2008 en Gonzalez, 2011). La implementación de los SUDS busca establecer en un medio antrópico un sistema de drenaje similar al de una cuenca natural (i.e. previo a la urbanización), mediante esquemas que acoplan medidas de prevención y control a

diferentes escalas. Lo anterior se logra mediante la implementación de una serie de medidas estructurales y no estructurales (Maksimovic, 2008, en González, 2011). Dicho concepto debe ser desarrollado de acuerdo con la jerarquía descrita a continuación (Woods-Ballard *et al.*, 2007, en González, 2011) procurando el manejo y control del agua pluvial y sanitaria progresivamente, evitando las llamadas “soluciones al final del tubo” (e.g. la construcción de grandes estructuras de saneamiento finales) las cuales han demostrado ser poco eficientes.

1. **Prevención:** comprende estrategias de diseño y control de la contaminación y de los picos de caudal máximo, buscando minimizar el consumo y promoviendo el reuso del agua. Asimismo, incluye la reglamentación y políticas al respecto.
2. **Control en la fuente:** se recomienda controlar la escorrentía superficial tan cerca a la fuente como sea posible, con el fin de reducir las estructuras de almacenamiento y tratamiento a final del tubo.
3. **Control local:** manejo del agua a nivel local, como barrios o parqueaderos. Incluye zanjas de infiltración, lagunas de estabilización, entre otras estructuras.
4. **Control regional:** control de la escorrentía a una mayor escala, comúnmente usando humedales o lagunas de detención.

Figura 4-7. Tren de SUDS. Adaptado de Maksimovic, 2008.



En este aspecto, el interés de la presente investigación es identificar aquellos componentes del tren de SUDS factibles de implementar en la reducción de las inundaciones urbanas. No obstante, estos mecanismos también se implementan para la reducción de problemáticas asociadas a la calidad del agua. De acuerdo con la clasificación planteada por Maksimovic (2008) y Woods-Ballard *et al.* (2007), a continuación se describen los componentes aplicables en un tren de SUDS (Gonzalez, 2011):

1. Estrategias de control en la fuente

- **Manejo doméstico:** incluye el barrido de superficies susceptibles de acumular contaminantes, que pueden ser lavados durante eventos de contaminación. La

implementación de este tipo de medidas requiere un componente importante de educación y reglamentación, para concienciar a la comunidad.

- **Almacenamiento en cubiertas:** consiste en la detención temporal de agua lluvia en las cubiertas de casas y edificios. Este tipo de medidas ayudan a reducir el pico de escorrentía, pero tienen efectos mínimos sobre la calidad del agua residual combinada (Maksimovic, 2008).
- **Almacenamiento en áreas pavimentadas:** estos sistemas tienen características similares al almacenamiento en cubiertas. Se busca aprovechar grandes áreas pavimentadas, como parqueaderos, y grandes superficies impermeables.
- **Techos verdes:** se denomina techo verde a la cobertura vegetal dispuesta sobre cubiertas de casas y edificios, con el fin de facilitar la infiltración y almacenamiento temporal del agua lluvia. Los techos verdes reducen el volumen de escorrentía, facilitan la evaporación e infiltración del agua lluvia, y tienen efectos positivos sobre la calidad del agua. Adicionalmente, pueden agregar un valor estético a las zonas urbanas.
- **Desconexión de bajantes:** como alternativa al almacenamiento de agua en la cubierta de los edificios, se puede almacenar el agua proveniente de las bajantes, usando tanques o mecanismos de infiltración.

2. Dispositivos de infiltración

- **Franjas de infiltración:** son estructuras de infiltración cubiertas con pasto, que conducen el agua lluvia hacia cuerpos receptores. Debido a que el agua es transportada a bajas velocidades, se facilita la infiltración y evaporación, lo que genera mejoras en la cantidad y calidad del agua.
- **Zanjas y estanques de infiltración:** son estructuras subterráneas de drenaje, diseñadas para proveer un almacenamiento capaz de reducir los picos de caudal.
- **Superficies permeables:** son áreas de terreno cubiertas con material permeable, que facilitan el almacenamiento del agua lluvia. Estos elementos reducen el volumen de escorrentía, y producen mejoras notables en la calidad del agua, usando el espacio de manera eficiente. Otro beneficio de este tipo de elementos, es la posibilidad de reusar el agua almacenada.

3. Lagunas y estanques:

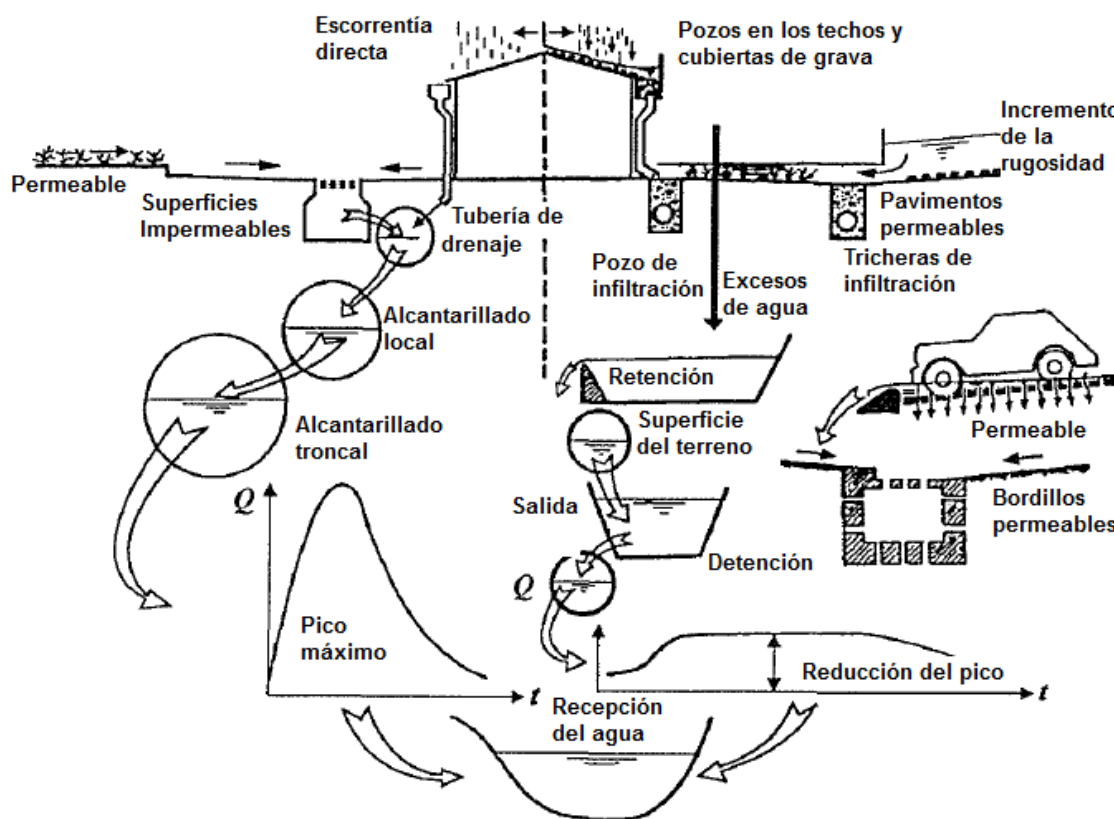
Los estanques son depresiones en el terreno usadas para almacenar escorrentía. Usualmente están cubiertas de vegetación, y no tienen agua durante tiempo seco. Tienen efectos benéficos sobre la calidad y la cantidad de agua, y sus desventajas son las grandes áreas necesarias para su implementación, y el riesgo de contaminación de acuíferos cercanos. Este tipo de estructuras, al igual que las lagunas y los humedales, generan beneficios en términos ambientales y de amenidad, e incluso pueden ser usadas para propósitos recreativos.

Las lagunas son estructuras que contienen agua incluso durante tiempo seco. Se dividen en lagunas de retención, lagunas de equilibrio y humedales. Las lagunas de retención se diseñan únicamente para almacenar agua lluvia, mientras que las lagunas de equilibrio son usadas para atenuar caudales pico, mediante el drenaje controlado del agua almacenada. Por su parte, los humedales son áreas poco profundas, cubiertas por vegetación acuática. Proveen buen tratamiento biológico, remoción de contaminantes y nutrientes, y promueven la biodiversidad.

Es de destacar que el sistema de drenaje de Bogotá D.C. cuenta con varios humedales naturales, en donde el ecosistema hace un esfuerzo por adaptarse a los comportamientos asociados al desarrollo territorial. No obstante, la dinámica y su situación ambiental, los humedales se han visto afectados por los procesos de urbanización, en donde en muchos casos han sido desconectados del sistema de drenaje de la ciudad y en la actualidad requieren ser integrados y protegidos. En general, la implementación de los SUDS debe estar basada en un análisis beneficio-costeo, por lo cual las medidas de control en la fuente son las más factibles de implementación a corto plazo, seguidas de las medidas de control regional en las que se requiere destinar inversiones de capital y de espacio, en donde los humedales naturales obvian parte de estos requerimientos, por lo cual se identifica que estos ecosistemas pueden ser adoptados en el tren de SUDS.

La correcta implementación de los SUDS, resultará en el manejo adecuado de la cuenca urbanizada como lo ilustra la Figura 4-8, en donde la implementación de una o más medidas de control conducen a una reducción en el pico máximo de respuesta de la cuenca ante un mismo evento de precipitación, mejorando no solo la gestión de las aguas pluviales, sino la gestión del agua en general, tanto para el abastecimiento como el drenaje y posterior tratamiento.

Figura 4-8. Concepto de gestión integrada del agua lluvia en áreas urbanizada. Adaptado de Maksimovic & Braga (1993).



4.8.3 Mitigación estimada de los SUDS

Si bien los SUDS presentan múltiples beneficios respecto a los sistemas convencionales en temáticas como el control de inundaciones y la remoción de carga contaminantes, aún existen muchas temáticas en las cuales se requiere profundizar como se muestra en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12. Comparación de los SUDS frente a los sistemas convencionales de drenaje. Adaptado de Momparler & Andrés-Doménech (2007).

	SISTEMA CONVENCIONAL COLECTORES	SISTEMA ALTERNATIVO SUDS
Coste de construcción	Pueden ser equivalentes, aunque los usos indirectos de los SUDS reducen su coste real	
Costes de operación y mantenimiento	Establecido	No establecido: falta experiencia
Control de inundaciones en la propia cuenca	Si	Si
Control de inundaciones aguas abajo	No	Si
Reutilización	No	Si
Recarga / Infiltración	No	Si
Eliminación de contaminantes	Baja	Alta
Beneficios en servicios al ciudadano	No	Si
Beneficios educacionales	No	Si
Vida útil	Establecida	No establecida: falta experiencia
Requerimientos de espacio	Insignificantes	Dependiendo del sistema, pueden ser importantes
Criterios de diseño	Establecidos	No establecidos: falta experiencia

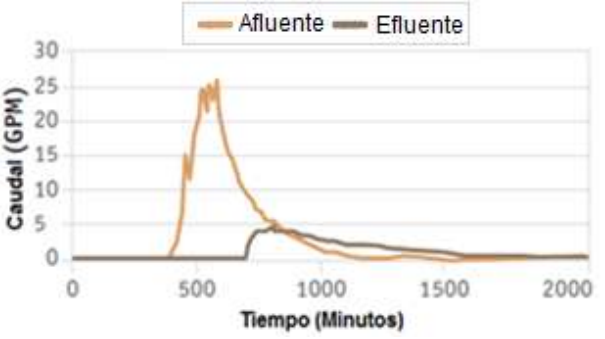
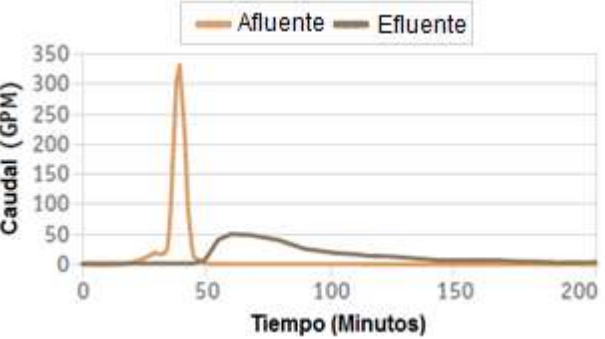
En la presente investigación es de interés establecer qué medidas pueden actuar dentro del “tren de acciones mitigadoras”, dentro del cual se incluyen los SUDS, en relación con el control de inundaciones urbanas. En investigaciones previas realizadas por UNH (2007), se evaluaron durante dos años (entre septiembre de 2004 y agosto de 2006) 16 sistemas de tratamiento de aguas pluviales por su capacidad para mejorar la calidad del agua de escorrentía y reducir la cantidad de escurrimiento de más de 30 eventos de lluvia-escorrentía. Los resultados de esta investigación, los cuales serán considerados como factibles de aplicación en la cuenca de estudio, se resumen en la Tabla 4-13 en donde los sistemas se clasifican por categorías: sistemas de desarrollo de bajo impacto (LID, por sus siglas en inglés), sistemas de mejores prácticas de gestión estructural (BMP, por sus siglas en inglés) y estructuras convencionales. En ésta se observa que todos los sistemas LID evaluados en *ibíd.* alcanzan un porcentaje de atenuación igual o mayor al 59% (i.e. en el caso del filtro de superficie de arena) y un tiempo de retraso promedio igual o mayor a 92 minutos (en el caso del sistema de biorretención Bio II). Los datos proceden de UNHSC y una variedad de fuentes, incluyendo la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU., los fabricantes, y los estudios académicos sobre el terreno (UNH, 2007). La Tabla 4-14 se muestran algunos SUDS y la modificación del hidrograma de caudal tras su implementación.

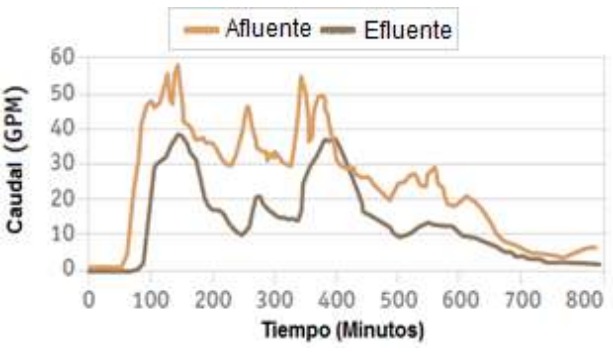
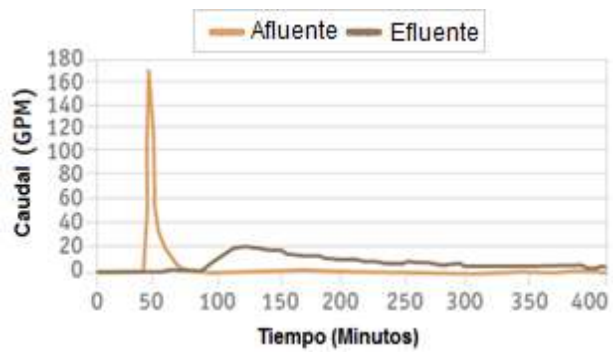
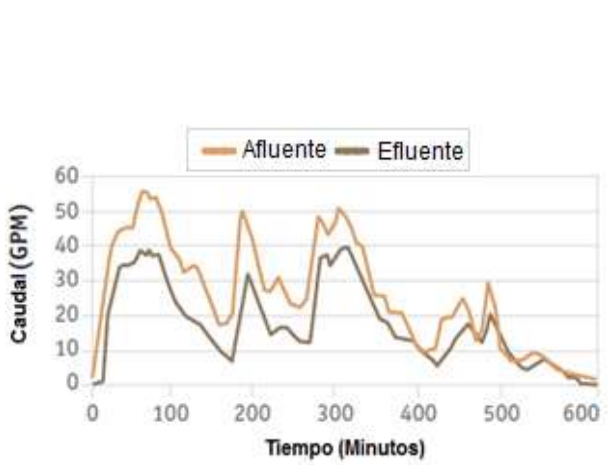
Tabla 4-13. Comparación entre sistemas factibles de utilización en el “Tren de acciones mitigadoras de inundaciones en áreas urbanas”. Adaptado de UNH (2007).

Sistemas de tratamiento de aguas pluviales	Referencia	Sólidos Suspendedos Totales (%Remoción)	Fósforo Total (%Remoción)	Nitrógeno inorgánico disuelto (%Remoción)	Zinc Total (%Remoción)	Hidrocarburos Totales de Petróleo en la gama diesel (%Remoción)	Caudal máximo promedio (% atenuación)	Tiempo de retraso promedio (Minutos)
Sistemas desarrollo bajo impacto (LID)								
Sistemas de								
Bio I con 48" BSM	UNH Stormwater Center	97	NA	44	99	99	85	615
Bio II con 30" BSM	UNH Stormwater Center	99	5	29	99	58	82	92
	USEPA Fact Sheet: Bioretention	90	70-83	NA	NA	NA	NA	NA
Bioretención 12" BSM	Winogradoff, 2001	NA	NT	NT	87	NA	NA	NA
Bioretención 24" BSM	Winogradoff, 2001	NA	73	NT	98	NA	NA	NA
Bioretención 36" BSM	Winogradoff, 2001	NA	81	23	99	NA	NA	NA
Humedal de grava (sumergido, flujo horizontal)	UNH Stormwater Center	99	55	99	99	99	81	315
	Claytor & Schueler, 1996	80-93	80-89	75	55-90	NA	NA	NA
	Winer, R., 2000	83	64	81	55	NA	NA	NA
Pavimento poroso	UNH Stormwater Center	99	38	NT	96	99	68	790
	NAPA, undated	89-95	65-71	NA	62-99			
	USEPA Fact Sheet: Porous Pavement	82-95	65	NA	NA	NA	NA	NA
	Winer, R., 2000	95	64	NA	99	NA	NA	NA
Filtro de superficie de arena	UNH Stormwater Center	51	33	NT	77	98	59	204
	USEPA Fact Sheet: Sand Filters	70	33	NT	45	NA	NA	NA
	Claytor & Schueler, 1996	85	50	NA	71	NA	NA	NA
	Bell, W., et al, 1995	61-70	NA	NA	>82	NA	NA	NA
	Winer, R., 2000	87	59	NT	80	NA	NA	NA
Filtro de árbol	UNH Stormwater Center	96	NT	37	96	88	NT	19
Sistemas BMP								
Unidad de calidad de agua ADS & Sistema de infiltración	UNH Stormwater Center	99	81	NT	99	99	83	294
	EPA Fact Sheet: Infiltration	NA	60	NA	NA	NA	NA	NA
Sistema Aqua-Filter	UNH Stormwater Center	62	26	NT	52	59	NT	NT
	USEPA website	84	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Separadores hidrodinámicos	UNH Stormwater Center	27	1	NT	24	42	NT	NT
	Low values from Bannerman, R. 2005; high values from laboratory-based testing from vendor*	15-84	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Claytor & Schueler, 1996	80-93	80-89	75	55-90	NA	NA	NA
	Winer, R., 2000	83	64	81	55	NA	NA	NA
Sistemas convencionales								
Pondaje de retención	UNH Stormwater Center	72	16	54	93	83	81	424
	USEPA Fact Sheet: Wet Detention Ponds	50-90	30-90	NA	40-50	NA	NA	NA
	USEPA Fact Sheet: Wet Detention Ponds	80-90	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Winer, R., 2000	79	49	36	65	NA	NA	NA
Canales de drenaje								
Canal en piedra	UNH Stormwater Center	50	NA	NT	66	33	NT	NT
Canal vegetado	UNH Stormwater Center	60	NT	NT	88	67	48	19
	USEPA Fact Sheet: Vegetated Swales	81	9	38	71	NA	NA	NA
	Claytor & Schueler, 1996	30-90	10-65	0-80	71	NA	NA	NA

Valores promedios anuales. NT= Ningún tratamiento, el sistema no afecta sus condiciones en este aspecto; NA= No se analizó.

Tabla 4-14. Hidrogramas de caudal en la implementación de SUDS. Adaptado de UNH (2007).

Pavimento poroso		% Atenuación promedio del pico
		68
Humedal de grava (sumergido y de flujo horizontal)		
		81
Sistema de biorretención (Bio II)		
		82

Filtro de superficie en arena		% Atenuación promedio del pico
		59
Unidad de calidad de agua ADS & Sistema de infiltración		
		83
Canales vegetados		
		48

Pondaje de retención		% Atenuación promedio del pico
		81

4.8.4 Evaluación final de la mitigación (M)

La factibilidad de aplicar un plan integral de mitigación dentro del cual se disponga de medidas estructurales y no estructurales articuladas dentro de un “Tren de medidas de mitigación de las inundaciones urbanas” para prevenir, afrontar y corregir la potencial afectación debido a las inundaciones, permitirá proteger el entorno urbanizado y alcanzar un valor menor de riesgo efectivo. Para identificar las medidas que actualmente se están implementando y que en un futuro próximo se implementarán dentro del área de estudio (i.e. en especial las medidas no estructurales) se recomienda hacer una revisión de los documentos de Ordenamiento Territorial, en los cuales se ha realizado una incorporación de la prevención y reducción de riesgos (en el caso de Bogotá D.C es posible consultar el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), Decreto 619 de 2000 de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2000). En relación con las medidas estructurales será recomendable dirigirse a documentos técnicos de soporte y planeación de las empresas prestadoras y reguladoras del servicio de acueducto y alcantarillado de la ciudad (ver Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Decreto 423 de 2006 de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2006b; EAAB, 2006). En el caso del diseño de un SUDS, su dimensionamiento deberá estar basado en un estudio de cuantificación y caracterización del agua de entrada al sistema, el cual se encuentre articulado dentro de un tren de SUDS y su mantenimiento asegurado durante toda su vida útil. En este aspecto, se recomienda revisar la metodología desarrollada y aplicada por Buitrago (2011) en el caso del predimensionamiento de una piscina de retención para el manejo de la escorrentía de techo de dos edificios en el campus de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Una vez enunciadas estas consideraciones de consecución de información acerca de las medidas que a nivel de cuenca se pretenden realizar, se procede a establecer una articulación de estas medidas por medio de la valoración normalizada de los indicadores que se involucran en el análisis de la mitigación. En busca de establecer espacialmente

la distribución de estos sistemas en el área de estudio, se plantea la construcción de un mapa o capa de mitigación según las condiciones planteadas por los escenarios de análisis empleado el programa ArcGIS, el cual resulta valioso para identificar aquellos sectores en los que factiblemente son insuficientes los sistemas empleados hasta el momento y se requeriría emplear estrategias articuladas en un plan de mitigación.

4.9 Evaluación del riesgo efectivo por inundación

La metodología de evaluación del riesgo efectivo por inundación desarrollada en la presente investigación plantea una visión holística del riesgo que permite establecer, desde las múltiples temáticas involucradas, una identificación realista del riesgo público por inundación en áreas urbanas teniendo en cuenta las condiciones físicas y operativas del sistema de alcantarillado pluvial.

De acuerdo con la formulación planteada del riesgo efectivo, numeral 3.2, la evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas se establece mediante la interacción de los factores involucrados en el riesgo holístico: la amenaza, la vulnerabilidad social, la vulnerabilidad física del área de estudio, la vulnerabilidad del sistema de alcantarillado (mediante la evaluación de sus condiciones físicas y operativas), la resiliencia y la mitigación (por medio de un “Tren de medidas de mitigación”).

Una vez identificados los índices e indicadores que involucra la evaluación de los factores y establecida una valoración para cada uno de estos, es posible determinar en las unidades geográficas de análisis un valor para los factores del riesgo público por inundación en áreas urbanas. A continuación se establece una revisión del fundamento conceptual empleado mundialmente para la valoración del riesgo y el planteamiento de la escala de evaluación del riesgo público para inundación en áreas urbanas propuesto en esta tesis.

4.9.1 Evaluación del riesgo a nivel mundial

De acuerdo con las metodologías de evaluación de riesgos en diversas áreas del conocimiento a nivel mundial, una forma óptima de afrontar la valoración del riesgo es considerarlo como el riesgo debido a la probabilidad de la ocurrencia del evento amenazante y su impacto o consecuencias probables sobre las personas y elementos vulnerables expuestos. Los factores que se tienen en cuenta para determinar la el riesgo potencial son los siguientes: el origen de la amenaza, el potencial del origen, la naturaleza de la vulnerabilidad y, por último, la existencia de mecanismos de control y la eficacia de éstos. La probabilidad de ocurrencia del evento amenazante puede describirse como alta, media y baja.

- Alta: el evento amenazante tiene una alta probabilidad de ocurrencia.
- Media: el evento amenazante tiene probabilidad de ocurrencia.
- Baja: el evento amenazante puede ocurrir en algún momento.

Por otra parte se tiene la evaluación del impacto del riesgo efectivo. Cabe mencionar que no todas las amenazas tendrán el mismo impacto, ya que cada elemento vulnerable tiene distintas características. La magnitud del impacto también puede clasificarse como alta, media y baja.

- Alta: Impacto grave sobre las personas, edificaciones o el medio ambiente.
- Media: Impacto importante sobre las personas, edificaciones o el medio ambiente.
- Baja: Impacto menor sobre las personas, edificaciones o el medio ambiente.

La combinación de la probabilidad de ocurrencia de la amenaza y el impacto que causa sobre los elementos vulnerables determinan el peso de cada factor de riesgo, como se muestra en la Figura 4-9, en donde el color rojo expresa un riesgo potencial alto, el color amarillo un riesgo potencial medio y el verde un riesgo potencial bajo.

Figura 4-9. Perfil del riesgo como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de la amenaza y su impacto sobre los elementos vulnerables.

Probabilidad de ocurrencia de la amenaza	Alto	5	7	≥ 9
	Medio	2	4	8
	Bajo	<1	3	6
		Bajo	Medio	Alto
		Impacto		

Es de destacar que en el caso de Bogotá D.C., en relación con lo establecido por la Alcaldía Mayor dentro de la “*Gestión prospectiva del riesgo futuro*” incluidos en el POT 2000, el territorio ha sido analizado desde el punto de vista de la amenaza por inundación fluvial pero no por el riesgo de inundación. En el POT 2000 el área ocupada y no ocupada del territorio de la ciudad de Bogotá D.C. se categoriza mediante una escala de amenaza de tres niveles: alta, media o baja, en donde las áreas categorizadas como de amenaza media y alta son objeto de condicionamientos para futuros desarrollos.

Teniendo en cuenta lo indicado en este numeral, a continuación se plantea una escala de riesgo público por inundación en áreas urbanas que permite caracterizar adecuadamente los niveles del riesgo en los cuales se encontraría sometida el área de estudio.

4.9.2 Escala del riesgo público por inundación en áreas urbanas

Siguiendo la estructura del perfil del riesgo como la combinación de la probabilidad de ocurrencia y su impacto, en la presente investigación se plantea la escala de nivel de Riesgo Público por Inundación en Áreas Urbanas (RPIU), la cual establece un valor de afectación asociado a las características más probables que lo acompañan para definir la

probabilidad del riesgo potencial: la afectación sobre las personas, las condiciones de operatividad del sistema de drenaje relacionadas y las características de los factores del riesgo en la zona afectada por encharcamiento o inundación en el área urbana.

Dentro de la probabilidad de ocurrencia de la amenaza se distinguen tres niveles:

- **Mínima:** Solo en casos extremos puede darse. Su probabilidad de ocurrencia es igual o menor al 1%, relacionado con el periodo de retorno de 100 años.
- **Media:** Su probabilidad de ocurrencia es menor al 4% y mayor al 1%, relacionado con el periodo de retorno de 25 años.
- **Alta:** Su probabilidad de ocurrencia es de entre el 100% y el 4%, relacionado con periodos de retorno menores a 25 años.

Dentro del impacto o consecuencias de la ocurrencia de la amenaza sobre los elementos vulnerables y expuestos se distinguen tres niveles de vulnerabilidad, los cuales provienen del análisis de vulnerabilidad total expuesto previamente:

- **Menor:** La ocurrencia de la amenaza genera sobre los elementos expuestos un nivel de afectación menor al 25% con respecto a su estado previo. Se relaciona con niveles de vulnerabilidad menores del 25%.
- **Moderada:** La ocurrencia de la amenaza genera sobre los elementos expuestos un nivel de afectación menor al 50% con respecto a su estado previo. Se relaciona con niveles de vulnerabilidad menores del 50%.
- **Mayor:** La ocurrencia de la amenaza genera sobre los elementos expuestos un nivel de afectación menor al 70% con respecto a su estado previo. Se relaciona con niveles de vulnerabilidad menores del 70%.

Dentro de la matriz de Riesgo Potencial de Inundación, Tabla 4-15, se distinguen tres áreas de Riesgo Potencial, a saber:

- **Riesgo Potencial Bajo (color verde):** Se estima una afectación menor, en donde la implementación de medidas mitigadoras deberán realizarse en el mediano plazo, en tanto su resiliencia le permitirá al elemento afectado continuar desarrollando sus actividades.
- **Riesgo Potencial Medio (color amarillo):** Se estima una afectación considerable en donde la implementación de medidas mitigadoras debe realizarse a corto plazo. Se deberá propender por fortalecer la resiliencia y las acciones mitigadoras ante las frecuentes afectaciones.
- **Riesgo Potencial Alto (color rojo):** Se estima como una afectación que inhabilita al elemento afectado para seguir con sus funciones, la implementación de medidas mitigadoras deberá ser inmediata y considerarse como prioridad por parte de las entidades relacionadas con la gestión del riesgo.

Tabla 4-15. Matriz de Riesgo Potencial de Inundación en Áreas Urbanas del RPIU

Matriz Riesgo Potencial RPIU	Impacto sobre los elementos vulnerables		
Probabilidad y severidad de ocurrencia de la amenaza	Menor	Moderado	Mayor
Mínima, S0 y S1	<1	3	5
Media, S2	2	6	8
Alta, S3 y S4	4	7	≥9

Una vez establecida la afectación potencial que puede sufrir un elemento vulnerable expuesto a la amenaza, es momento de evaluar su capacidad para restituirse y enfrentar situaciones de riesgo recurrentes. Esta capacidad de resiliencia disminuye significativamente los efectos del riesgo potencial, permitiendo que aquellos elementos con alta resiliencia enfrenten riesgos de nivel medio eficazmente. Una vez la capacidad de resiliencia se ha manifestado se tiene un nuevo nivel de riesgo, el cual se verá disminuido al implementar medidas mitigadoras que sean eficientes a corto, mediano y/o largo plazo. Estas medidas mitigadoras actuarán sobre el riesgo que no es posible enfrentar por medio de la resiliencia, siendo éste el que en últimas afectará realmente al elemento vulnerable. De acuerdo con la Tabla 4-16 se plantea el riesgo efectivo en función de las medidas mitigadoras empleadas, las cuales se clasifican en tres niveles de acuerdo con su eficacia en el corto, mediano y largo plazo, entendiendo la eficacia como la capacidad de las medidas mitigadoras para cumplir con su papel reductor del riesgo con el paso del tiempo.

Tabla 4-16. Matriz de Riesgo Efectivo ante la implementación de medidas mitigadoras

Matriz Riesgo Efectivo RPIU	Medidas mitigadoras efectivas:		
Riesgo potencial	a largo plazo	a mediano plazo	a corto plazo
Bajo			
Medio			
Alto			

Una vez ilustradas las relaciones que componen los niveles de riesgo, se propone una escala de riesgo público por encharcamiento y/o inundación denominada “Escala de Hernández & Cubillos” por sus autores. En esta escala, Tabla 4-17, se identifica la probabilidad de ocurrencia asociada al evento detonante y las factibles afectaciones sobre los elementos vulnerables en función de la severidad de la amenaza. Asimismo, se muestra la escala de normalización entre 0.1 y 10, la cual tiene 10 escalas de nivel de riesgo, y cuyos colores ilustran el mapa de riesgo público de inundación en el área de estudio. Una vez obtenido este mapa de riesgo, se procede a implementar las medidas mitigadoras y a configurar niveles mayores de resiliencia para que, al volver a evaluar el nivel de riesgo, los nuevos niveles del riesgo efectivo sean menores que los potenciales.

Tabla 4-17. Escala de valoración del Riesgo Público por Inundación, propuesta por Hernández & Cubillos.

Valor Normalizado	Probabilidad de ocurrencia (%)	Identificador del nivel de riesgo	Nivel de severidad	Características del nivel de riesgo
0.01 - 0.1	<=1		S0	Áreas en donde el riesgo es muy bajo. La probabilidad de ocurrencia de la amenaza es irrelevante (1%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno mayor a 100 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno mayores a 100. La vulnerabilidad suele ser muy baja. No se supone la necesidad de medidas mitigadoras.
0.1 - 1	1 - 10		S1	Áreas en donde el riesgo es bajo. La probabilidad de ocurrencia de la amenaza es menor (1%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno de 100 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno de 100 años. La vulnerabilidad es baja. Las medidas de aumento de la resiliencia y las medidas mitigadoras no son prioritarias.
1 - 2	10 - 20		S1	Áreas en donde el riesgo es bajo. La probabilidad de ocurrencia de la amenaza es menor (1%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno de 100 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno cercano a los 100 años. No obstante, la movilidad peatonal puede verse afectada en las vías con pequeños encharcamientos. La vulnerabilidad es media. Las medidas de aumento de la resiliencia y las medidas mitigadoras no son prioritarias.
2 - 3	20 - 30		S1	Áreas en donde el riesgo es bajo y tiende a medio. La probabilidad de ocurrencia de la amenaza comienza a ser moderada (1.3%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno mayores a 75 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno mayores a los 75 años. Los niños y adultos mayores ven afectada su movilidad. Los vehículos requieren un tiempo y distancia de frenado mayor. La vulnerabilidad es baja y las medidas mitigadoras del riesgo potencial se implementarán a mediano plazo.
3 - 4	30 - 40		S2	Áreas en donde el riesgo es medio. La probabilidad de ocurrencia de la amenaza es moderada (2%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno de 50 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno de 50 años. Los niños y adultos mayores pierden estabilidad. La movilidad vehicular se vuelve lenta. La vulnerabilidad es media. Las medidas de aumento de la resiliencia y las medidas mitigadoras del riesgo potencial se implementarán a mediano plazo.
4 - 5	40 - 50		S2	Áreas en donde el riesgo es medio. Áreas en donde la probabilidad de ocurrencia de la amenaza es media (4%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno de 25 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno de 25 años. Los peatones adultos pierden estabilidad y deben sortear los imperfectos de las aceras. La movilidad vehicular se vuelve lenta. La vulnerabilidad es media. Las medidas de aumento de la resiliencia y las acciones mitigadoras del riesgo potencial se implementarán a mediano plazo.
5 - 6	50 - 60		S2	Áreas en donde el riesgo es medio y tiende a ser alto. La probabilidad de ocurrencia de la amenaza es media (4%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno de 25 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno de 25 años. Los peatones deben encontrar refugio en zonas altas. La movilidad vehicular se vuelve lenta y los vehículos pequeños pierden adherencia. Se recomienda que ciclistas y motociclistas busquen refugio y se detengan por completo. La vulnerabilidad es alta. Las medidas de aumento de la resiliencia y las medidas mitigadoras del riesgo potencial se implementarán entre el mediano y el corto plazo.
6 - 7	60 - 70		S3	Áreas en donde el riesgo tiende a ser alto. Áreas en donde la probabilidad de ocurrencia de la amenaza comienza a ser mayor (5%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno de 20 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno de 20 años. Los peatones deben encontrar refugio en zonas altas y los habitantes deberán disponer los enseres de los primeros pisos en áreas más altas. Se recomienda que la totalidad de vehículos detengan la marcha. Las viviendas se ven constantemente expuestas a la humedad. La vulnerabilidad es alta. Las medidas de aumento de la resiliencia y las medidas mitigadoras del riesgo potencial se implementarán entre el mediano y el corto plazo.
7 - 8	70 - 80		S3	Áreas en donde el riesgo es alto. Áreas en donde la probabilidad de ocurrencia de la amenaza es mayor (5%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno de 20 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno de 20 años. Se recomienda que la totalidad de vehículos detengan la marcha. Existen afectaciones en las viviendas que se relacionan con brotes de humedad constantes como efecto de las aguas de inundación. La vulnerabilidad es alta. Las medidas de aumento de la resiliencia y las medidas mitigadoras del riesgo potencial se implementarán entre en el corto plazo.
8 - 9	80 - 90		S3	Áreas en donde el riesgo es alto. La probabilidad de ocurrencia de la amenaza es alta (10%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno de 10 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno de 10 años. Se recomienda que no se presenten peatones en las calles ni vehículos en movimiento a riesgo de ser arrastrados por la corriente. Existen afectaciones en las viviendas que se relacionan con grietas y fisuras efecto de las aguas de inundación, las cuales pueden poner en riesgo la estabilidad de la edificación. La vulnerabilidad es alta. Las medidas de aumento de la resiliencia y las medidas mitigadoras del riesgo potencial se implementarán entre en el corto plazo.
9 - 10	90 - 100		S4	Áreas en donde el riesgo es muy alto. Áreas en donde la probabilidad de ocurrencia de la amenaza es severa (20%) y se asocia a la línea de inundación producida por desbordes de periodo de retorno menores de 5 años y/o situaciones de encharcamiento con lluvias de periodo de retorno menores a 5 años. Los elementos expuestos son arrastrados por la inundación. Las afectaciones en las edificaciones previamente afectadas pueden desatar el colapso. La vulnerabilidad es alta. Las medidas de aumento de la resiliencia y las medidas mitigadoras del riesgo potencial deberán implementarse a la mayor brevedad para evitar el desastre.

4.10 Manejo de la información para la aplicación de la metodología RPIU

En el presente numeral se hace referencia al manejo de la información a emplear dentro de la aplicación del RPIU. En primer lugar se hace referencia a la información base necesaria para la completa aplicación de la metodología y sus fuentes de consecución para la ciudad de Bogotá D.C.; en segundo lugar, se aborda la temática del manejo de la información geográfica empleando sistemas de información geográfica, para lo cual se propone una metodología para la edición y empleo de este sistema para la aplicación de los indicadores, en donde por medio de operaciones de mapas es posible representar geográficamente las escalas de los índices y finalmente los factores de evaluación del riesgo.

4.10.1 Información base requerida para la aplicación de la metodología RPIU

La información base requerida para la correcta aplicación de la metodología incluye información geográfica, hidrológica, hidráulica, topográfica, geomorfológica, catastral, demográfica y social, la cual permitirá caracterizar el medio en el que se desarrolla el riesgo público por inundación en el área urbana. En particular, cada uno de los indicadores, índices y factores a evaluar en la metodología RPIU requerirá cierto tipo de información base para su aplicación.

Dada la complejidad de los sistemas de alcantarillado existentes en las áreas urbanas, la complejidad de las variables climatológicas y la configuración del territorio urbano, es necesario contar con información primaria y secundaria de calidad en todas las áreas a consultar. En el mejor de los casos la información secundaria es suministrada por las entidades públicas y privadas, y se espera sea completa, suficiente y actual para realizar la aplicación de la metodología; en todo caso, una vez obtenidos los registros, el paso siguiente será realizar un análisis de consistencia de la información (registros hidrológicos de precipitación, registros de caudal, registros de nivel, entre otros) previo a su procesamiento. No obstante, en algunas áreas la información puede ser incompleta, inexacta o desactualizada para los análisis requeridos, por lo cual se debe recurrir a levantar la información en campo. En ese caso será necesario asesorarse con especialistas de cada disciplina e implementar metodologías válidas de recolección de información, instrumentación, uso de escalas de medición, duración y frecuencia del muestreo, y demás actividades que permitirán el correcto levantamiento de la información de campo.

Para la caracterización de la condición actual de las corrientes urbanas se requiere del levantamiento de información primaria, para lo cual es útil emplear formatos de levantamiento en campo que permitan la rápida y acertada recopilación de la información. En este aspecto existen muchos tipos de formatos, entre los cuales se

encuentra el propuesto por Barros & Vallejo (2007), elaborado para la recolección de información actual de un tramo, el cual se define como “un sector longitudinal del cauce en el cual se conservan características similares de geometría, material de conformación y problemas ambientales”. El formulario se divide en tres partes: ubicación del tramo, geometría y materiales del tramo, y estado de los problemas ambientales. Este tipo de formularios deberán ser empleados para cada tramo o unidad de análisis de levantamiento de la información, de acuerdo con el alcance que se quiera dar al estudio.

Para el caso de la ciudad de Bogotá D.C., en relación con el sistema de drenaje de la ciudad, la EAAB cuenta con un inventario de las redes disponible al público en la biblioteca de la entidad y por medio de su página web al Sistema de Información Geográfico Unificado Empresarial, SIGUE¹³. Por otra parte, en la actualidad la EAAB está desarrollando la herramienta SIRA, la cual busca unificar la información de las características de las redes de alcantarillado contenida en el sistema de información geográfico de la empresa (SIGUE), con un modelo estructural del estado actual de las redes. Según la EAAB (2010) *“...el modelo estructural está basado en la inspección de 350 km de redes...después de un proceso estadístico en donde se analizaron diversas variables, se extrapoló el estado actual de los aproximadamente 8000 Km de redes existentes en la ciudad de Bogotá”*.

Por otra parte, las fases de evaluación de la vulnerabilidad social, la vulnerabilidad física del área de estudio y la resiliencia, se ha de realizar mediante el análisis conjunto de información heterogénea, con lo cual se debe lograr integrar indicadores, índices y factores, representativos, de fácil comprensión, y de fácil de consecución, con el objeto de establecer una metodología útil y aplicable. Es importante destacar que la selección de los indicadores que permitan evaluar cada uno de los factores del riesgo está condicionada por la disponibilidad de la información, su precisión y dominio, las cuales provienen de bases de datos de las entidades distritales de la ciudad de Bogotá D.C., entre las cuales se encuentran:

- **POT 2000 (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2000):** Plan de Ordenamiento Territorial para Santa Fe de Bogotá, Distrito Capital. Documento de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. con el apoyo de las entidades distritales, para la planificación de la ciudad. Son de especial interés los shapefiles generados por la Secretaría Distrital de Planeación en relación con las principales entidades geográficas de la ciudad (i.e. localidades, UPZ, barrios, equipamiento, entre otros). Dentro de estos shapes se encuentran los desarrollados por el Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Subdirección de Desarrollo Humano y Progreso Social; como fruto de la consultoría realizada por el arquitecto

¹³ No obstante, la EAAB indica que *“...la información de las redes de acueducto y alcantarillado disponibles para consulta en el sistema SIGUE pueden presentar variaciones respecto a los valores de diámetro, longitud, material, pendiente, cota, etc. y adicionalmente pueden estar desactualizados con relación a las nuevas redes que han entrado en operación. Si requiere de información complementaria contáctenos”*. <http://www.acueducto.com.co/>

José Eslava en el tema de equipamientos colectivos y servicios urbanos, contrato No. 173 de 1999. Por tanto, por el contenido de esta carpeta se otorgan los créditos en especial al DAPD, Subdirección de Desarrollo Humano Y Progreso Social.

- **Bogotá en Datos (SHD & IEU, 2005):** Iniciativa conjunta de la Secretaría de Hacienda Distrital (SDH) y el Instituto de Estudios Urbanos de la Universidad Nacional de Colombia (IEU) desarrollada entre el 2002 y el 2005 con el objetivo de presentar un sistema de información sobre el comportamiento de los principales indicadores socioeconómicos de la ciudad. Este proyecto permite entender la configuración espacial y social del D.C. (características geográficas, ocupación del territorio y organización de sus habitantes), conocer los resultados de las acciones que ha ejecutado el Gobierno Distrital en diversas áreas y destacar las acciones adelantadas en tres ámbitos específicos: Fisco, Ordenamiento Territorial y Administración Pública.
- **Sistema de Consulta de Datos de Información Estadística (SDP, 2010):** Página web de la Secretaria Distrital de Planeación (SDP) que permite acceder a la información de la ciudad de Bogotá D.C. correspondiente al Censo General 2005, las proyecciones de población del Distrito Capital 2005-2015 y la Encuesta de Calidad de Vida 2007.
- **CENSO 2005 (DANE, 2005):** Página web del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) que permite realizar consultas del Censo General 2005, para diferentes niveles geográficos colombianos. El Censo Básico tiene un nivel geográfico de agregación mínima de manzana catastral, al igual que el Censo Ampliado. Emplea el software REDATAM (CELADE- División de Población, CEPAL).
- **Observatorio Ambiental de Bogotá (SDA, 2010):** El Observatorio Ambiental de Bogotá es un sitio web de la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA) que permite conocer a través de indicadores ambientales el estado y la calidad del ambiente en Bogotá D.C., así como los resultados de la gestión desarrollada por varias entidades del Sistema Ambiental del Distrito Capital (SIAC) frente a problemas ambientales de la ciudad. El OAB es una herramienta que permite democratizar la información ambiental, dado que integra indicadores de múltiples dimensiones del desarrollo, recursos y temas de la gestión ambiental; alineándose con los principios de la Agenda XXI en el capítulo 40 "Información para la adopción de decisiones", donde se enfatiza que cada persona es a la vez usuario y portador de información, que incluye datos y el conjunto adecuado de experiencias y conocimientos".

4.10.2 Metodología de manejo de la información geográfica implementada en la aplicación de la metodología RPIU

El manejo de la información geográfica empleada en la aplicación de la metodología RPIU se realizó con el software ArcGIS, en donde para cada shape (también denominado shapefile, el cual hace referencia a un formato de archivo informático capaz de almacenar datos espaciales, desarrollado por la compañía ESRI), se establece la

forma de las entidades espaciales a través de una reunión de polígonos, líneas y/o puntos, los cuales permiten contener las características y propiedades que se deseen asignar al elemento, mediante la edición de la tabla de atributos de cada shape).

Para la aplicación de la metodología RPIU en la ciudad de Bogotá D.C, se empleó la información geográfica proveniente de las fuentes mencionadas en el numeral anterior. Para el procesamiento de esta información geográfica, se siguieron los pasos descritos a continuación:

- En relación con la información consultada y disponible en shapefiles (provenientes del POT 2000, EAAB, SDP, entre otras entidades), generalmente cada empresa maneja parámetros y códigos diferentes para organizar la información, por lo cual se identificó una diferencia en el sistema coordenado proyectado y en la proyección, siendo necesario para el apropiado manejo de la información, llevar a cabo un proceso de georreferenciación de todos los shapes para uniformizar el sistema coordenado y la proyección geográfica (en la aplicación se empleó el sistema coordenado proyectado Bogota_Ciudad_Bogota, la proyección Transverse_Mercator y el sistema coordenado geográfico GCS_Bogota).
- Una vez los shapes fueron correctamente georreferenciados, se prosiguió a editarlos, debido a que se adquirió información de Bogotá y se trabajó el área correspondiente a una subcuenca pluvial urbana. Para delimitar la mencionada subcuenca se usaron los polígonos de las UGAs que la conforman (Unidades de Gestión del Alcantarillado, de acuerdo con la EAAB).
- Posteriormente, se procedió a realizar la edición de los atributos de cada uno de los shapes: como primer paso se verificó la validez de los atributos ya incluidos (en polígonos: área, perímetro, entre otros; en líneas: diámetro, pendiente, entre otros) y como segundo paso, se adicionó a la tabla de atributos la información correspondiente a los indicadores de la metodología, por medio de la identificación de un atributo común (código DANE, código catastral ó nombre).
- Es posible observar la interacción y valores de ponderación de los indicadores, índices y factores, en la tabla de atributos de los shapes.
- En el Anexo F se presenta el mapa de amenaza por encharcamiento desarrollado con el modelo Iber y exportado en formato shape; el mapa de vulnerabilidad total, el cual se construye a partir de la agrupación de los factores de vulnerabilidad social, física y del sistema de alcantarillado, con los cuales se crean el mapa de riesgo potencial; el mapa de resiliencia estimada para la situación actual; el mapa de mitigación, en el cual se proponen posibles medidas mitigadoras con respecto a lo encontrado en la información secundaria; el mapa de riesgo efectivo, el cual se constituye como el resultado del cruce de los mencionados factores.

4.10.3 Limitaciones de la información empleada en la aplicación de la metodología RPIU

Las mayores limitaciones identificadas en relación con la información empleada en la aplicación de la metodología RPIU son:

- La disponibilidad y consecución de la información, la cual es fuertemente custodiada por las entidades consultadas y a las cuales fue posible tener acceso mediante solicitudes realizadas para los propósitos de la presente tesis y en investigaciones previas del grupo de investigación GIREH, mediante acuerdo de confidencialidad para uso académico.
- La incompatibilidad entre códigos de entidades (especialmente entre los códigos para identificar las manzanas en el DANE y en la SDP), de los cuales se logró descifrar una gran cantidad mediante tablas de equivalencia y consultas detalladas.
- La desactualidad de los datos de población, debido a que el último censo oficial del país fue en el año 2005. Asimismo, la información del POT 2000 proviene del año 1999.
- La ausencia de información demográfica y social disponible a niveles de agregación más detallados, la cual, en el mejor de los casos, es a nivel de manzana.

5 Escenarios de análisis

En el presente capítulo se establecen los escenarios de aplicación de la metodología RPIU, con el objeto de evaluar la perspectiva temporal de operatividad del alcantarillado pluvial en un sector de Bogotá D.C., a partir de la evaluación del riesgo público de inundación por falla del sistema de alcantarillado pluvial bajo diferentes condiciones o escenarios.

De acuerdo con Barbat & Pujades (2004), al igual que la amenaza, el riesgo puede plasmarse en mapas probabilísticos o determinísticos. En este último caso, los mapas de riesgo representan un único escenario, o sea la distribución espacial de los efectos potenciales que puede causar un suceso de una intensidad dada sobre un área geográfica, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad de los elementos que componen el sistema expuesto. Estos mapas, son de fundamental importancia para la planeación de la mitigación del riesgo potencial y para la elaboración de los planes de contingencia que los organismos operativos deben realizar durante la etapa de preparación para emergencias.

En este capítulo se describen los escenarios propuestos, el primero de los cuales establece las condiciones actuales. Los demás escenarios simulan condiciones futuras en términos de cambios hidrológicos, poblacionales, de condiciones físicas de la red de alcantarillado, de operación y mantenimiento de la red de alcantarillado, y de la implementación de obras de mitigación. Como en términos generales siempre existirá una situación de desbalance entre las acciones mitigadoras, incluidas las capacidades de los cuerpos de prevención y de atención de emergencias, y los peores escenarios posibles de desastre que pueden llegar a presentarse, la política de preparación en el largo plazo debe incluir cada vez escenarios más exigentes que establezcan con certeza el riesgo efectivo residual que debe ser corregido.

5.1 Escenario 1: Condición actual

El primer escenario de la metodología RPIU representa la condición actual del área de estudio. El desarrollo de este primer escenario, es decir el reconocimiento de las condiciones actuales del área de estudio, se amplía en el capítulo 6. Es de destacar que mucha de la información actualmente disponible para aplicar la metodología RPIU en Bogotá D.C. presenta rezagos (i.e. información del POT 2000, información poblacional

del censo 2005 (DANE, 2005), y demás reportes de entidades públicas), por consiguiente el escenario de condiciones actuales corresponderá a la implementación de la información oficial más reciente en caso de no existir para el año actual de aplicación de la metodología, 2012.

Las conclusiones que resulten de la aplicación de la metodología RPIU en la cuenca de estudio para la condición actual, pueden corroborarse con afectaciones registradas por el FOPAE en la ciudad de Bogotá D.C. Estos resultados buscan alentar a las entidades encargadas de la gestión del riesgo por inundación, a la elaboración de estudios detallados sobre los factores del riesgo y la búsqueda de la disminución del riesgo.

5.2 Escenarios de condiciones futuras factibles

A través de la formulación de estos escenarios para la evaluación del riesgo efectivo futuro, se busca establecer de forma realista las condiciones físicas y demandas futuras a las que va a estar sujeto el sistema de alcantarillado pluvial y las condiciones futuras del área de estudio. Para establecer la perspectiva temporal de operatividad del sistema de alcantarillado se implementa la metodología RPIU con cada uno de los escenarios futuros.

En la definición de los escenarios futuros se establecen condiciones cambiantes para los siguientes cinco aspectos:

- Magnitud de la precipitación según el periodo de retorno considerado igual al horizonte temporal del análisis.
- Magnitud de la población según su dinámica de variación poblacional.
- Condición física de la red (en función de su edad de instalación y material).
- Operación y mantenimiento según un programa previsto por la EAAB.
- Integración gradual de acciones de mitigación con Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible. Sus aspectos mitigadores debido a su utilización, se establecerán en función de lo establecido para estos sistemas en el numeral 4.8 del presente documento. No se considera dentro del alcance de la presente investigación el dimensionamiento ni diseño de estos sistemas.

A continuación se presentan las condiciones que presentan cada uno de los escenarios futuros planteados.

5.2.1 Escenario 2: Proyecciones a 2020

En este escenario se realiza el análisis lluvia - escorrentía para un periodo de retorno de diez años, es decir, el periodo de retorno se asume igual al horizonte temporal de análisis respecto al de condiciones actuales. Las condiciones de población se establecen para el año 2020, a partir de la información demográfica proveniente de las proyecciones del Censo del año 2005 (DANE, 2005). En relación con el uso del suelo, se establece que las zonas de desarrollo propuestas por el POT 2000 han sido urbanizadas de acuerdo con el

uso predominante en el sector, lo cual introduce un aumento en la población y por ende, aumento de los aportes de las descargas sanitarias al sistema de alcantarillado. En relación con la condición física de las redes de alcantarillado, se estima que han pasado diez años con respecto a las condiciones actuales, por lo cual, las redes han sufrido una disminución en su vida útil remanente efectiva. Esta es función de su material y la edad de instalación. La operación y mantenimiento que se plantea se lleve a cabo para el año 2020 se establece a partir de los documentos del vigente Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado (EAAB, 2006) y de lo planteado en el software SIRA para el área de estudio. En lo que respecta a la implementación de obras de mitigación, se establece la implementación de un pondaje de retención en las manzanas del área de estudio identificadas como parques. La mitigación en atenuación del pico máximo de caudal se establece por medio del porcentaje de retención reportado para este sistema en la Tabla 4-14 y si el 10% del área verde se implementa para el pondaje de retención.

5.2.2 Escenario 3: Proyecciones a 2030

En este escenario se realiza el análisis lluvia - escorrentía para un periodo de retorno de veinticinco años, es decir, el periodo de retorno más cercano al horizonte temporal de análisis respecto al de condiciones actuales. Las condiciones de población se establecen para el año 2030 a partir de la información demográfica proveniente de las proyecciones del Censo del año 2005 (DANE, 2005). En relación con la condición física de las redes de alcantarillado, se estima que han pasado veinte años con respecto a las condiciones actuales, por lo cual, las redes han sufrido una disminución en su vida útil remanente efectiva. La operación y mantenimiento que se plantea se lleve a cabo para el año 2020 se establece como del 3% de las redes con mayor valor de falla funcional. En lo que respecta a la implementación de obras de mitigación, los pondajes implementados en el escenario anterior se han ampliado a un 30% del área disponible de parques.

5.2.3 Escenario 4: Proyecciones a 2051

De acuerdo EAAB & Cubillos, R. (2009) y EAAB & ECI (2010), para el año 2051 la ciudad de Bogotá alcanzará su población de saturación en función con el límite máximo de desarrollo calculado a partir de la información disponible, como el área libre, la población inicial y las normas de utilización del espacio físico que permite establecer parámetros de densidad residencial en personas por unidad de superficie.

Para este escenario se plantean establecer las condiciones del sistema de alcantarillado y del riesgo público por inundación en el año 2051, considerando el análisis de la dinámica poblacional de saturación, del comportamiento hidráulico del sistema de alcantarillado y de las condiciones sociales y territoriales de la metodología RPIU.

Tabla 5-1. Resumen de escenarios propuestos

Escenarios / Criterios	Magnitud de la precipitación según el periodo de retorno, considerado igual al horizonte temporal de análisis	Magnitud de la población*	Condición física de la red	Operación y mantenimiento según programa previsto por en el PMAA***	Integración SUDS (Pondaje de retención en un porcentaje de las manzanas de parques)****
Condiciones actuales	TR 3 años	Población a 2012	Función de la edad de instalación del elemento (tramo de red o pozo de inspección) y del material	Ninguno	No implementado
Condiciones a 2020	TR 10 años	Población a 2020		Reemplazo del 1%	10%
Condiciones a 2030	TR 25 años	Población a 2030		Reemplazo del 3%	30%
Condiciones a 2051	TR 50 años	Población de saturación 2051 **		Reemplazo del 5%	50%

Nivel de análisis geográfico: Manzana Catastral

* Proyecciones con base en el Censo 2005 (DANE, 2005)

** Población de saturación para Bogotá estimada por EAAB & Cubillos, R. (2009) y EAAB & ECI (2010), en función con el límite máximo de desarrollo calculado a partir de la información disponible, como el área libre, la población inicial y las normas de utilización del espacio físico que permite establecer parámetros de densidad residencial en personas por unidad de superficie.

*** Plan maestro de acueducto y alcantarillado (EAAB,2006) Se propone el reemplazo del % de las redes con falla funcional

**** El pondaje de retención tiene un 81% de atenuación del caudal pico, asumiendo lo contenido en UNH (2007).

6 Caracterización de la subcuenca “Salitre Bombeo”, Bogotá D.C.

En este capítulo se caracterizan las condiciones actuales de la subcuenca combinada “Salitre Bombeo”, seleccionada como área de estudio para la aplicación de la metodología de evaluación del riesgo público por inundación, RPIU. La selección de esta subcuenca, la cual hace parte de la cuenca del río Salitre, proviene de una extensa revisión de las subcuencas que hacen parte del área urbanizada de Bogotá D.C.

6.1 Selección de la subcuenca de estudio

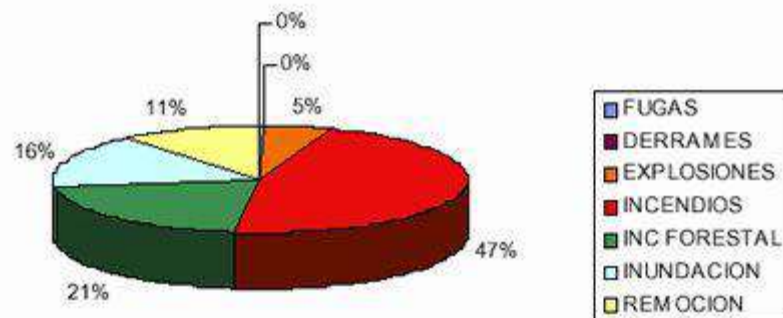
La selección de la subcuenca de análisis se vio marcada por múltiples consideraciones. En primer lugar, el énfasis investigativo de la presente tesis se enmarca en el manejo de las aguas lluvias en áreas urbanas con especial atención al funcionamiento del sistema pluvial. No obstante, en Bogotá D.C. un alto porcentaje del área de la ciudad drena sus aguas hacia el río Bogotá por medio de un sistema de alcantarillado combinado y de sistemas de alcantarillado separado (i.e. sanitario y pluvial), en los cuales se presenta un alto porcentaje de conexiones erradas¹⁴, por lo cual, desarrollar la aplicación en una subcuenca combinada permite considerar la mayor cantidad de elementos de análisis de la metodología y es realista con la situación predominante en la ciudad. No obstante, se considera que una aplicación para evaluar el riesgo público por inundación predominantemente producida por aguas sanitarias deberá ampliarse a futuro, enfocándose en el análisis de la proliferación de vectores amenazantes debido a la exposición a este tipo de aguas, en enfermedades del ser humano y otros organismos, en el deterioro físico y estructural, y en el impacto ambiental de los ecosistemas.

¹⁴ De acuerdo con EAAB (2007)...“La cuenca que presenta la mayor cantidad de conexiones erradas es Tunjuelo, debido a que el río del mismo nombre presenta niveles de agua muy altos en época húmeda, que impiden el libre drenaje de las aguas lluvias, convirtiéndose el Interceptor Tunjuelo Medio al estar más profundo, en la opción de drenaje más fácil y barata para los habitantes de la zona; se estima que alrededor del 90% del área está mal conectada. En la cuenca del Salitre se encontró que el porcentaje de área conectada al sistema sanitario del Interceptor Izquierdo del Córdoba es muy significativa, llegando a valores superiores al 40%. En las mediciones realizadas en la cuenca del Fucha, los porcentajes de área mal conectados medidos son del 23% para el Interceptor de Kennedy y del 33% para el Interceptor del Sur.”

En la búsqueda de la subcuenca de aplicación de la metodología RPIU en Bogotá D.C., se encontró una numerosa cantidad de áreas expuestas a la amenaza por inundación, como lo reportan DPAE (2010), DPAE (2011), FOPAE (UPES) & HIDROTEC (1999), FOPAE. (2009). Adicionalmente, en múltiples investigaciones e informes consignados en el centro de documentación del DPAE relacionados con la zonificación de riesgo por inundación en Bogotá D.C., se identifica como mecanismo de falla primordial la inundación fluvial, por lo general, sin un análisis de otros factibles mecanismos de falla generadores del riesgo por inundación en áreas urbanas.¹⁵ Debido a la amplia cantidad de ríos y canales a cielo abierto que se encuentran inmersos en Bogotá D.C. y que incluso delimitan su área urbanizada (e.g. Río Bogotá en el sector occidental de la ciudad), la inundación fluvial es uno de los mecanismos de falla más importantes y los estudios desarrollados por investigadores previos han permitido establecer un mapa de amenaza por inundación cuyo mecanismo de falla es la inundación fluvial.¹⁶

La problemática de la amenaza por inundación en Bogotá D.C. es tan recurrente que el DPAE expresa que “...En la ciudad se producen periódicamente inundaciones menores o encharcamientos a causa de la insuficiencia de los sistemas de alcantarillado de los barrios que están cercanos a los ríos, en especial al río Bogotá y a los ríos Tunjuelo, Fucha y Juan Amarillo en la parte baja de sus cuencas, ya que no pueden drenar cuando el nivel del agua de los mismos supera cierto nivel.”¹⁷ Como se muestra en la Figura 6-1 el mayor porcentaje de desastres ocurridos en Bogotá D.C en el periodo 1994-1998 corresponde a inundaciones.

Figura 6-1. Desastres ocurridos en Bogotá durante el período 1994-1998 (FOPAE, Página Web consultada el 7 de octubre de 2010, <http://www.fopae.gov.co/>).



En este sentido, la metodología RPIU enfatiza en el análisis de la determinación del riesgo público por inundación por falla del sistema de alcantarillado, es decir que el mecanismo de

¹⁵ Se recomienda realizar la lectura del numeral 3.6, en el cual se describen los mecanismos de falla generadores de inundación en áreas urbanas.

¹⁶ Se recomienda revisar el Plan de Ordenamiento Territorial 2000 y mapas de amenaza por inundación fluvial en el centro de documentación de DPAE.

¹⁷ FOPAE, Página Web. Consultada el 7 de octubre de 2010, <http://www.fopae.gov.co/>

falla generador de inundación en el área urbanizada sea predominantemente la falla funcional y estructural del sistema de alcantarillado que sirve de drenaje pluvial en la subcuenca. En este aspecto, la presenta el análisis de información disponible en algunas subcuencas de la cuenca del río Salitre, para lo cual la subcuenca “Salitre Bombeo” reúne las características deseadas para la aplicación, en donde la vulnerabilidad del sistema de alcantarillado de la subcuenca y su relación con la amenaza por inundación netamente pluvial, determina en gran medida el riesgo potencial de inundación.

Tabla 6-1. Comparación entre posibles cuencas de aplicación de la metodología RPIU

	Cuenca Salitre	Subcuenca Molinos	Subcuenca Jaboque	Subcuenca El Virrey	Subcuenca Salitre Bombeo
Estaciones PG	4 estaciones muy dispersas	Estación Usaquén Santa Ana	Sin estación. Estación Casa Bombas Salitre a 6 km	Instrumentada por U.Andes	Estación Casa de Bombas Salitre
# UGAS		10	6	10	14
Independencia hidráulica	NO	SI	SI	SI	SI
Tipo de redes	Combinadas y separadas	Separadas	Separadas	Combinadas	Combinadas
Edad de las redes		1933 - 2008	1985 - 2008	1933 - 2008	1933 - 2009
Cauce principal	Canal Juan	Canal Molinos	Humedal Jaboque	Canal Virrey	Canal Salitre
Control hidráulico	Río Bogotá	Humedal Córdoba	Humedal Jaboque	Entrega del Canal Virrey	Estación Elevadora Salitre
UPZ	30	3	2	2	5
Estratos	1,2,3, 4, 5, 6	1,2,3, 4, 5, 6 (predominante el	2, 3	3, 4, 5, 6 (predominante el	2, 3, 4,
Nivel de agregación DANE	UPZ, Barrio	UPZ, Barrio, Manzana	UPZ, Barrio, Manzana	UPZ, Barrio, Manzana	UPZ, Barrio, Manzana
SIRA	Dispersos	SI, CALIFICADO	NO	NO	SI
Identificadas afectaciones de inundación por la EAAB	SI	NO	SI	NO	SI

Otra consideración que influyó en la selección de la subcuenca “Salitre Bombeo” es la cantidad de afectaciones por inundaciones y encharcamientos que se han reportado en épocas de lluvia a entidades como la EAAB y el DPAE, y que han sido ampliamente informados a los ciudadanos por los medios de comunicación, ante las dificultades de movilización del tránsito debido a los constantes encharcamientos de la Avenida Carrera 68 entre Calles 63 y 80, las cuales son consideradas como parte de la malla vial arterial de la ciudad. Los reportes de eventos de ola invernal en la subcuenca, verificados por DPAE (2007, 2009, 2010a, 2010b, 2011), serán empleados en la validación de los datos obtenidos con la metodología, temática a tratar en el Capítulo 8.

Posteriormente, se revisaron aquellas subcuencas combinadas del área urbana que no dependen hidráulicamente de otras subcuencas y de las cuales la EAAB cuenta con información de redes recientemente verificadas, esto por recomendación de los ingenieros de la EAAB de las oficinas de Red Troncal e Ingeniería Especializada, en busca de manejar la menor incertidumbre posible en los datos topológicos de la red de alcantarillado. En este

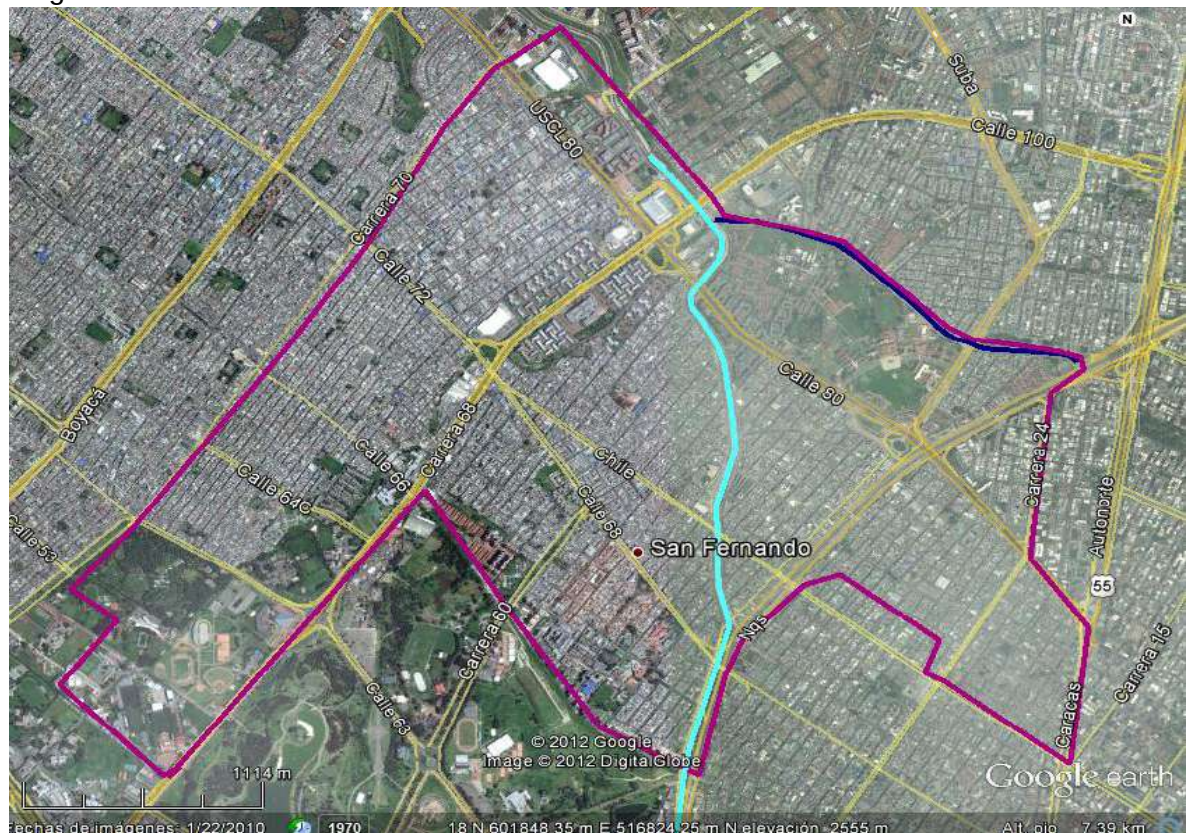
aspecto, los resultados de la aplicación de la metodología están limitados por la disponibilidad, calidad y cantidad de la información disponible.

Bajo estas consideraciones fue seleccionada la subcuenca “Salitre Bombeo” para ejemplificar la aplicación de la metodología propuesta, RPIU. En un futuro cercano, se espera que la metodología propuesta sea replicada a las demás cuencas de la ciudad por parte de personal idóneo de las entidades encargadas del recurso hídrico y la gestión del riesgo en Bogotá D.C. (i.e. principalmente EAAB y DPAE) considerando las particularidades de cada una de éstas, con el objeto de implementar la herramienta en el apoyo a los mecanismos de gestión del riesgo por inundación. A continuación, se destacan los aspectos más relevantes que caracterizan a la subcuenca “Salitre Bombeo”.

6.2 Localización de la subcuenca “Salitre Bombeo”

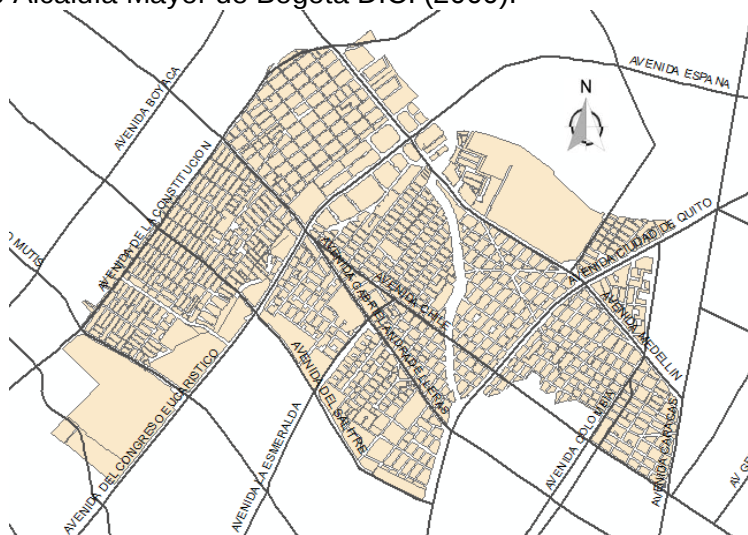
La subcuenca “Salitre Bombeo” se localiza en el norte de Bogotá D.C., en el sector suroriental de la cuenca del río Salitre. En la Figura 6-2, delineado en color morado, se observa el área de la subcuenca “Salitre Bombeo”. La mencionada subcuenca tiene una extensión aproximada de 8.85km^2 (i.e. 885.14ha).

Figura 6-2. Localización general de la subcuenca “Salitre Bombeo”, Bogotá D.C. Imagen Google Earth.



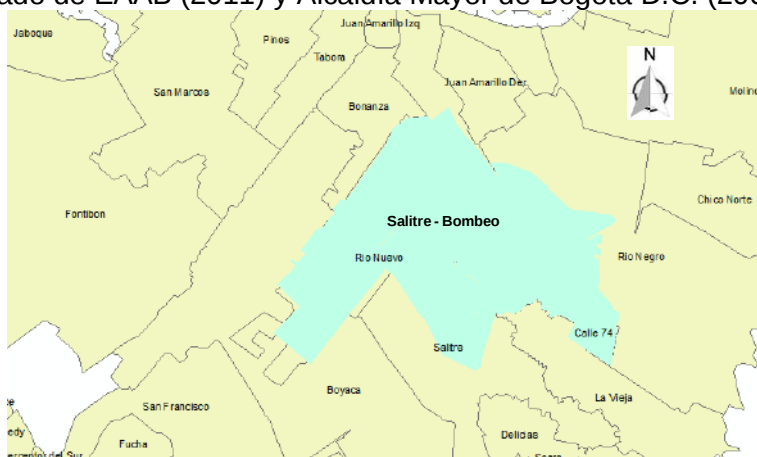
En relación con la malla vial de la ciudad de Bogotá D.C., Figura 6-3, la subcuenca “Salitre Bombeo” limita al noroccidente con la Avenida de la Constitución también llamada Avenida General Gustavo Rojas Pinilla (i.e. Carrera 66 A), al oriente con la Avenida Caracas (i.e. Carrera 14) y con la Avenida Paseo de Los Libertadores (i.e. Autopista Norte), al sur por tramos con la Avenida Chile (i.e. Calle 72), la Avenida del Salitre (i.e. Calle 64) y el área de la manzana del Jardín Botánico, la Unidad Deportiva El Salitre y Coldeportes, al suroccidente de la Avenida José Celestino Mutis (i.e. Calle 63).

Figura 6-3. Localización general de la subcuenca “Salitre Bombeo” en relación con la malla vial. Adaptado de Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2000).



En relación con el sistema de drenaje de la ciudad, la subcuenca “Salitre Bombeo” limita al norte con las subcuencas Bonanza y Juan Amarillo Derecho, al sur con las subcuencas La Vieja, Boyacá y Delicias, al oriente con las subcuencas Río Negro y Chico Norte y al occidente con la subcuencas Fontibón y San Marcos, Figura 6-4.

Figura 6-4. Subcuenca combinada “Salitre Bombeo” en relación con las subcuencas aledañas. Adaptado de EAAB (2011) y Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2000).



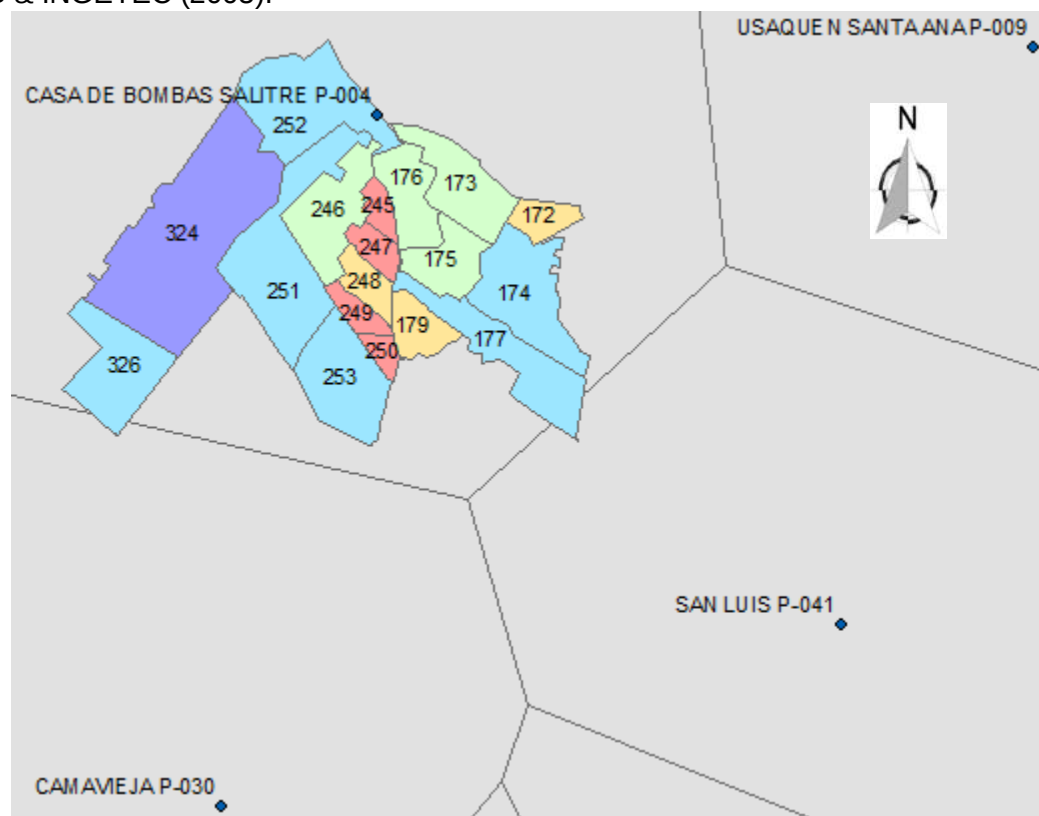
6.3 Recurso hídrico en la subcuenca “Salitre Bombeo”

De acuerdo con EAAB & INGETEC (2005), en el norte de la subcuenca “Salitre Bombeo” se localiza la estación pluviográfica denominada Casa de Bombas Salitre (EAAB P-004) cuyas coordenadas son 1°09.100 N, 1°01.100 E, ubicada a una altura de 2580msnm.

En el espacio circundante de la subcuenca se localizan otras estaciones operadas por la EAAB: Usaquén Santa Ana (PG P-009) ubicada aproximadamente a 6 km, San Luis (PG, P-041) a 6.2 km y Camavieja (CO, P-030) a 6.3 km con relación a la estación Casa de Bombas Salitre, por lo que estas estaciones se localizan a distancias que establecen respuestas hidrológicas poco representativas dentro de la subcuenca “Salitre Bombeo”, quedando como único centro de tormenta válido para el análisis hidrológico la estación Casa de Bombas Salitre.

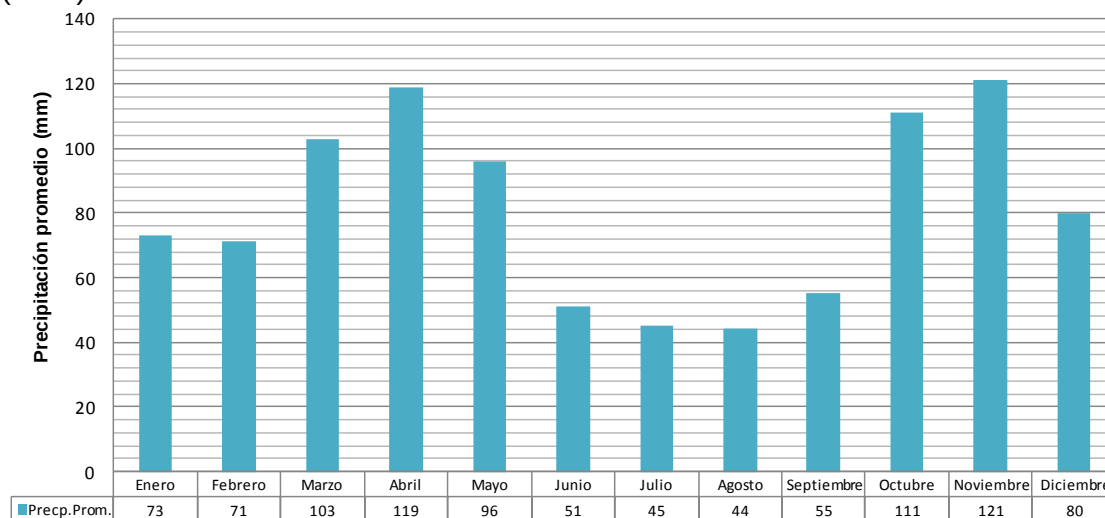
En la Figura 6-5 se establece la localización de las mencionadas estaciones en relación con la subcuenca “Salitre Bombeo”, en la cual se presenta su subdivisión en áreas de drenaje denominadas UGAs (EAAB, 2011), las cuales se consideran como Unidades de Gestión del Alcantarillado que delimitan áreas en donde los parámetros característicos del sistema de drenaje son similares.

Figura 6-5. UGAs de la subcuenca “Salitre Bombeo” y localización de la estación pluviográfica Salitre Casa de Bombas (EAAB P-004) y demás mencionadas. Información de EAAB & INGETEC (2005).



De acuerdo con lo registrado por IDEAM & FOPAE (2007), el área urbana de la subcuenca “Salitre Bombeo” presenta un comportamiento temporal de la precipitación de tipo bimodal. El primer periodo de lluvias comprende los meses de marzo, abril y mayo, y el segundo los meses de octubre y noviembre. Entre estos dos periodos, los meses de transición se caracterizan por presentar días alternados de lluvias y tiempo seco. En relación con el análisis temporal del régimen de lluvias en la subcuenca “Salitre Bombeo”, la Figura 6-6 presenta los promedios mensuales de precipitación para la estación Casa de Bombas Salitre, en donde el promedio anual es de $868\text{mm} / \text{año}$.

Figura 6-6. Promedios mensuales de precipitación en la estación Casa de Bombas Salitre (EAAB P-004) para el periodo 1971-2000. Datos del software Tormenta, EAAB & INGETEC (2005).



En relación con el análisis espacial de la precipitación en la subcuenca “Salitre Bombeo”, esta se ve influenciada por el gradiente en sentido oeste-este ó gradiente orográfico, en donde la cercanía a los cerros orientales refiere mayores niveles de precipitación. Asimismo se ve influenciada por el gradiente en sentido sur-norte debido al paso de la Zona de Confluencia Intertropical. Para establecer las particularidades espaciales de la precipitación en la ciudad de Bogotá D.C., EAAB & IRH (1995) y su actualización EAAB & INGETEC (2005), construyeron las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (i.e. curvas IDF), en donde para el caso de la estación Salitre Casa de Bombas (EAAB P-04) corresponde a 21 años de registro, entre 1981 y 2003, Figura 6-7 y Tabla 6-2.

La ecuación de las curvas para cada período de retorno es del tipo:

$$I(T) = C_1 (D + X_0)^{C_2} \quad (6-1)$$

Donde:

I Es la intensidad para un período de retorno dado (Tr), en mm/h.

D La duración de la lluvia, en minutos.

C_1 , C_2 y X_0 Son los parámetros de ajuste.

Figura 6-7. Curva Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), estación Salitre Casa de Bombas (EAAB P-004) para el periodo 1981-2003. Elaborada con datos de EAAB & INGETEC (2005).

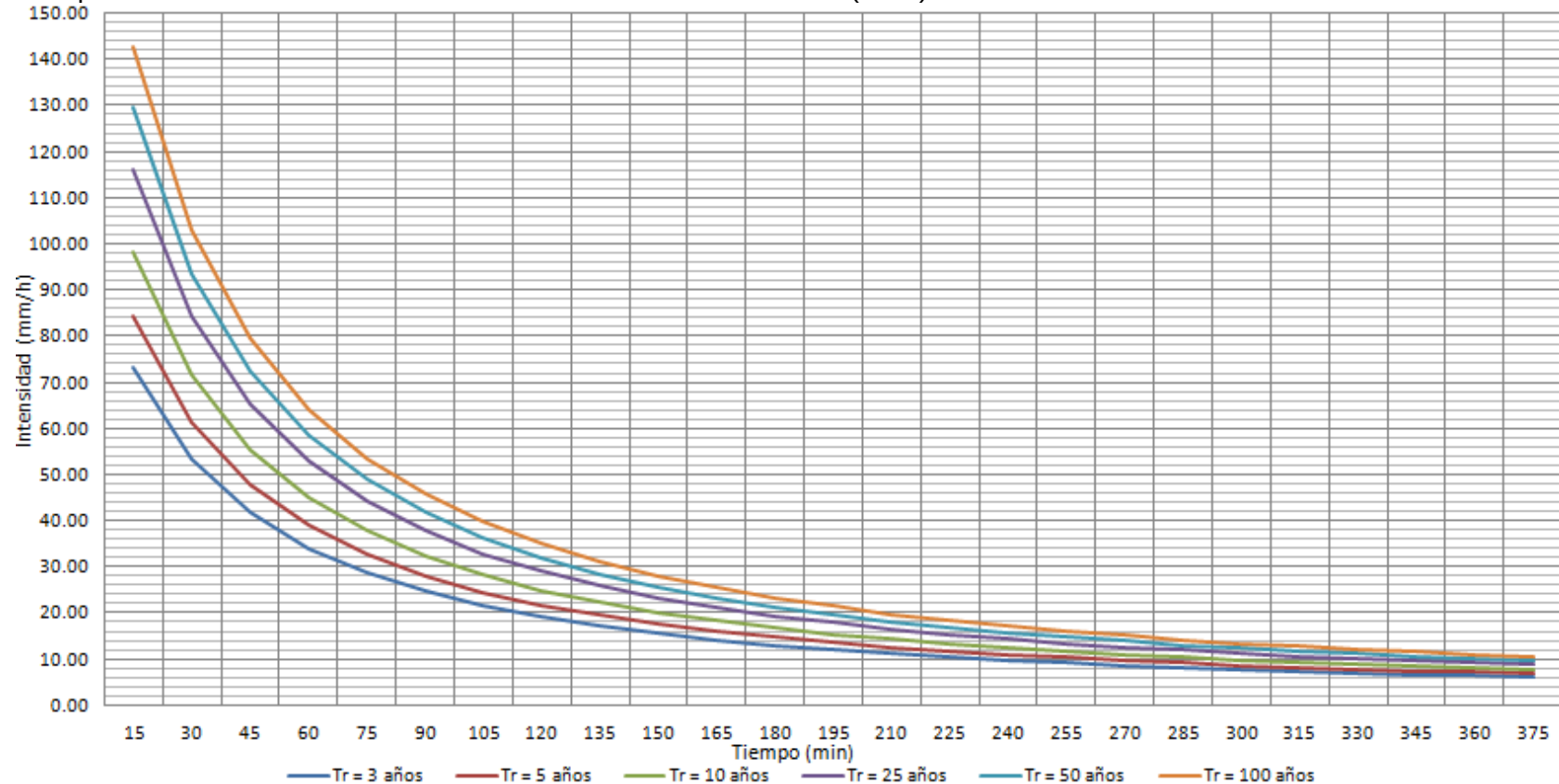
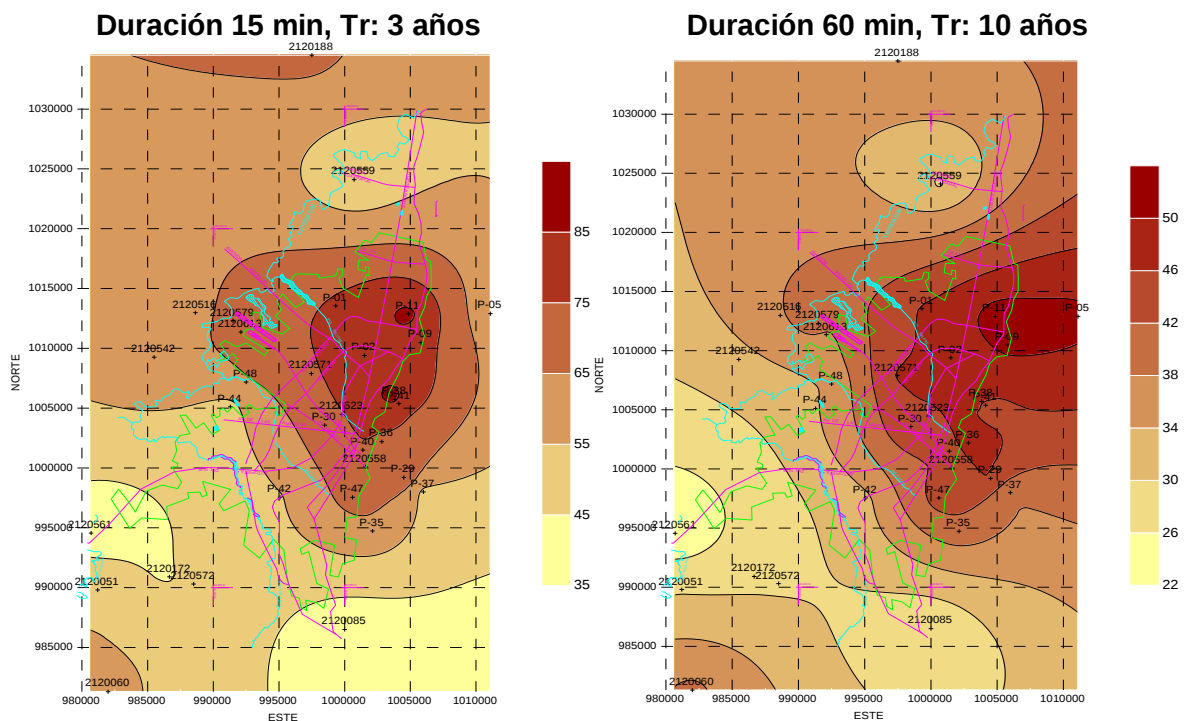


Tabla 6-2. Relaciones Intensidad - Duración - Frecuencia de la estación Salitre Casa de Bombas (EAAB P-004) para el periodo 1981-2003. EAAB & INGETEC (2005).

PERÍODO DE RETORNO	N	TR 3			TR 5			TR 10			TR 25			TR 50			TR 100		
		C1	X0	C2	C1	X0	C2	C1	X0	C2	C1	X0	C2	C1	X0	C2	C1	X0	C2
P-04 CASA B SALITRE	21	7093.70	34.2	-1.17	8461.22	33.9	-1.18	11127.62	34.7	-1.21	14099.06	34.9	-1.23	16214.11	34.9	-1.24	18294.49	34.9	-1.24

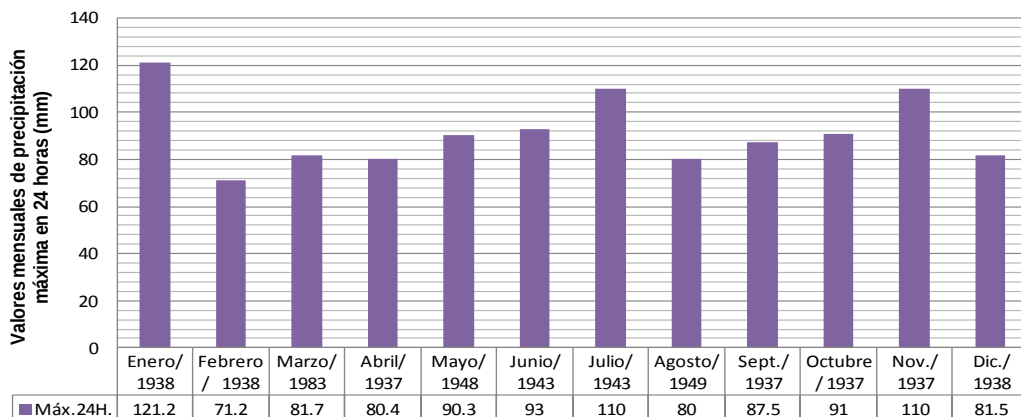
De acuerdo con la Figura 6-8, las isolíneas de intensidad evidencian que la subcuenca “Salitre Bombeo” se localiza en un foco de tormentas intensas, en especial para duraciones de la precipitación de entre 15 y 60 minutos con periodos de retorno de entre 3 y 25 años, esto debido a su ubicación en la parte baja del piedemonte norte de la cordillera oriental sobre la sabana de Bogotá. Para duraciones mayores de 60 minutos en periodos de retorno mayores a los 25 años, las mayores intensidades se dirigen a la parte alta de los cerros orientales.

Figura 6-8. Mapas de isolíneas de intensidad (mm/h) para la ciudad de Bogotá D.C. Tomado de EAAB & IRH (1995).



Es importante destacar que la densidad de estaciones pluviográficas en la ciudad de Bogotá D.C. es baja y la separación entre estas es de 6 km en promedio. El hecho que el centro de tormenta representado por la estación Casa de Bombas Salitre (EAAB P-004) se encuentre localizado al interior de la subcuenca “Salitre Bombeo” proporciona datos de precipitación más realistas para establecer la factible respuesta del sistema de drenaje de la subcuenca en tiempo húmedo. No obstante, se destaca que el emplear un único centro de tormenta en el análisis hidrológico de una subcuenca de aproximadamente 8.85 km^2 , establece una alta incertidumbre para la estimación de caudales veraces en tiempo húmedo. Con el objeto de establecer el escenario factible de tiempo húmedo más extremo de acuerdo con la información disponible, se analiza el comportamiento de las lluvias máximas en 24 horas para la estación Casa de Bombas Salitre (EAAB P-004), en el cual se observan altos valores para meses atípicos como lo son enero y julio, Figura 6-9.

Figura 6-9. Valores mensuales de precipitación máxima en 24 horas (mm) para la estación Casa de Bombas Salitre (EAAB P-004). Datos de EAAB & INGETEC (2005).



Con respecto al comportamiento de los eventos de precipitación registrados en la estación Salitre Casa de Bombas en el periodo de 1981-2003 reportados por EAAB & INGETEC (2005), se estableció el evento de mayor precipitación acumulada registrado (i.e. 58.7 mm) y el evento de mayor duración registrado (i.e. 17.5 horas), cuyas curvas de masa se presentan en la Figura 6-10 y la Figura 6-11, respectivamente. Para el caso de la Figura 6-10 se observa que el evento de mayor precipitación acumulada tuvo una duración de 3 horas, lo cual proporciona una idea de la duración del evento a construir con el hietograma de diseño.

Figura 6-10. Curva masa evento de mayor precipitación acumulada (07/11/1988). Datos de EAAB & INGETEC (2005).

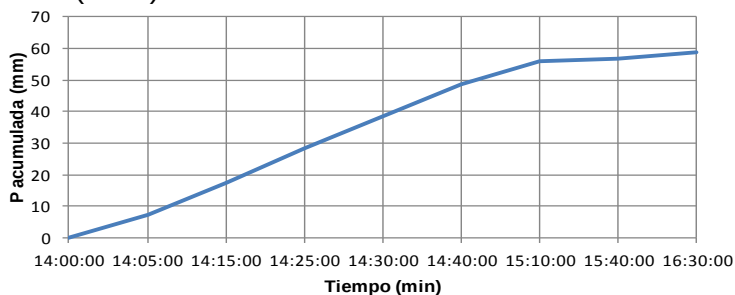
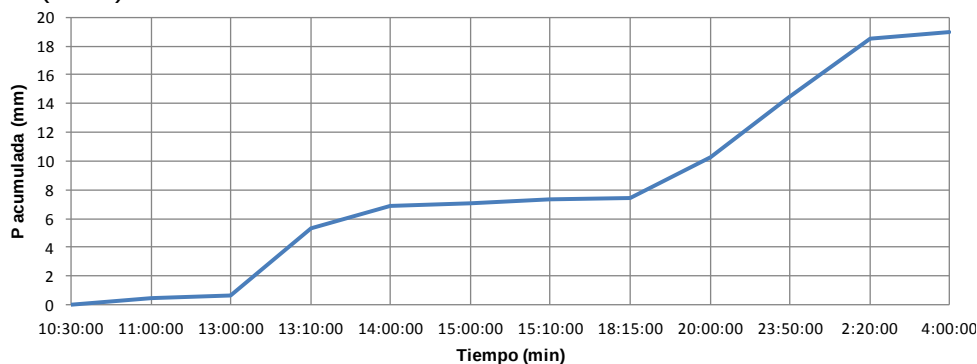
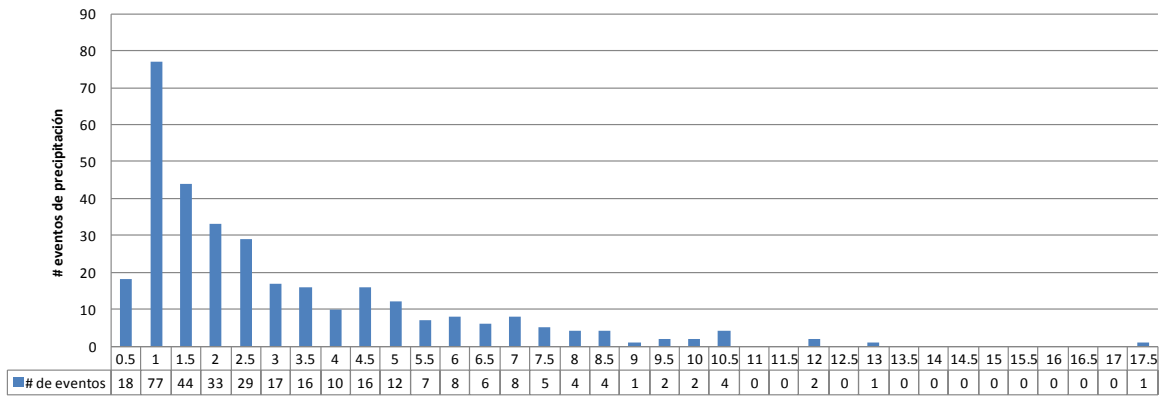


Figura 6-11. Curva masa evento de mayor duración (24/06/2000). Datos de EAAB & INGETEC (2005).



Como insumo para la modelación hidráulica de la subcuenca, se calcularon los hietogramas de diseño para los periodos de retorno (i.e. 3, 5, 10, 25, 50, 100) con el método de bloques alternos como se describió previamente en el numeral 4.3.1. Estos hietogramas son de utilidad para la modelación hidrodinámica de la amenaza por precipitación en la llanura inundable. Con el objeto de identificar la duración óptima de los hietogramas de diseño a construir se graficó el histograma de frecuencia simple de la duración los eventos registrados por la estación Salitre Casa de Bombas P-004 entre los años 1981 y 2003.

Figura 6-12. Histograma de frecuencia simple de duración de los eventos de precipitación registrados en la estación Salitre Casa de Bombas P-004 (1981-2003).



De acuerdo con la Figura 6-13 la mayor frecuencia de duración de los eventos de precipitación se encuentra entre los treinta minutos y una hora. Teniendo esto en consideración y analizando las curvas de masa presentadas previamente, se estima una duración de tormenta de 4 horas. A continuación se presentan los hietogramas de diseño generados para los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Figura 6-13. Hietograma de diseño, periodo de retorno 3 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.

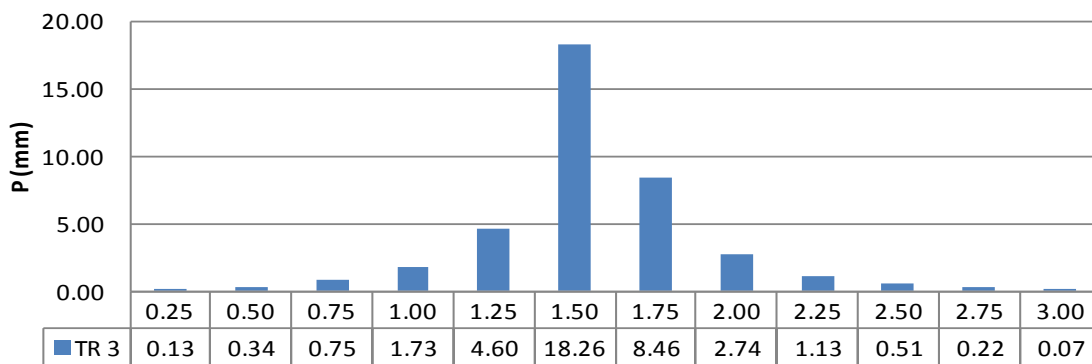


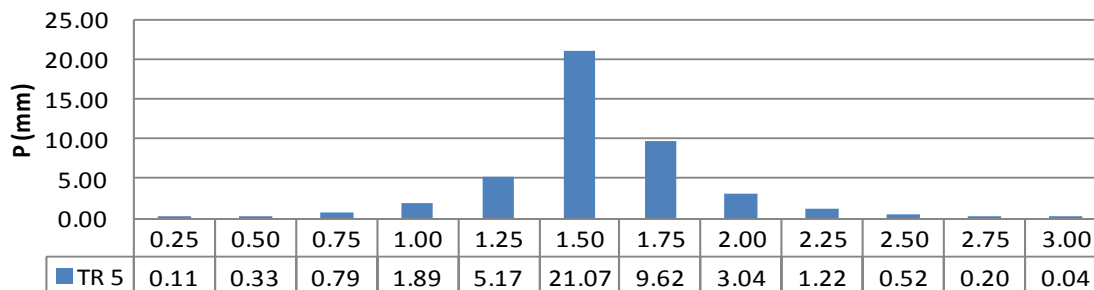
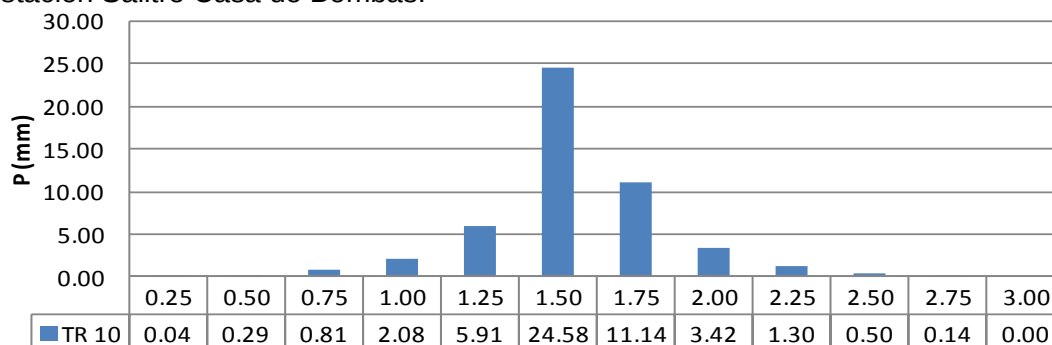
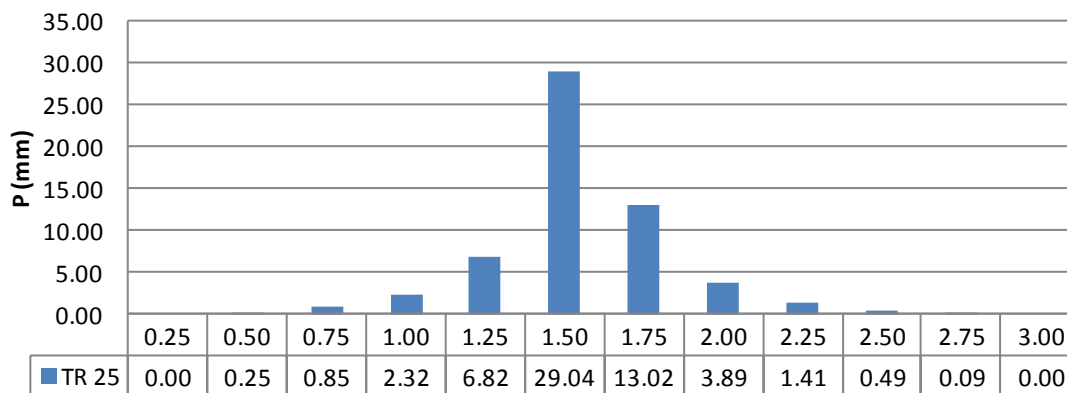
Figura 6-14. Hietograma de diseño, periodo de retorno 5 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.**Figura 6-15.** Hietograma de diseño, periodo de retorno 10 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.**Figura 6-16.** Hietograma de diseño, periodo de retorno 25 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.

Figura 6-17. Hietograma de diseño, periodo de retorno 50 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.

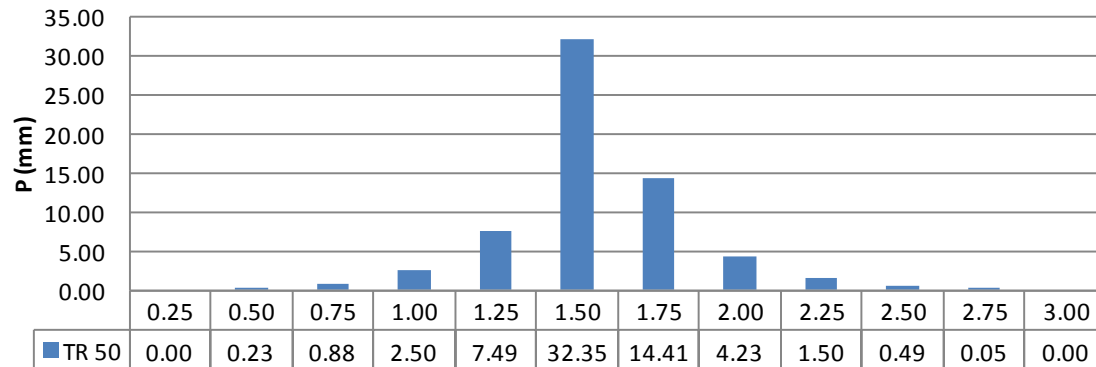
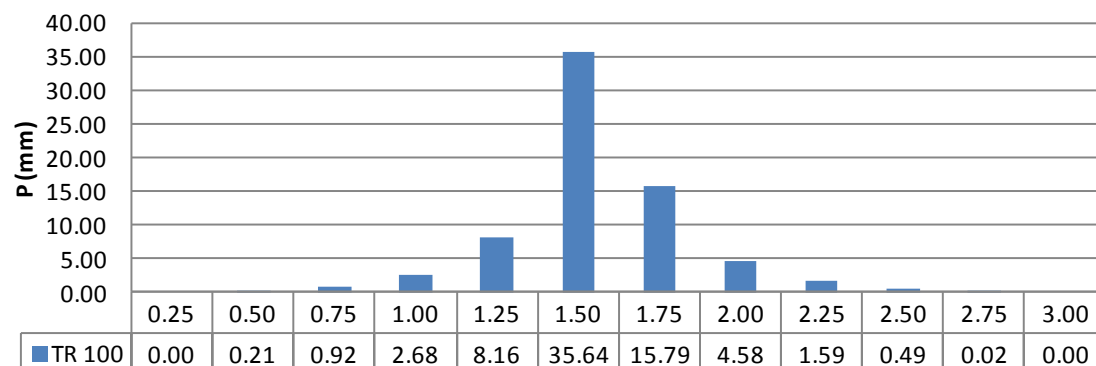


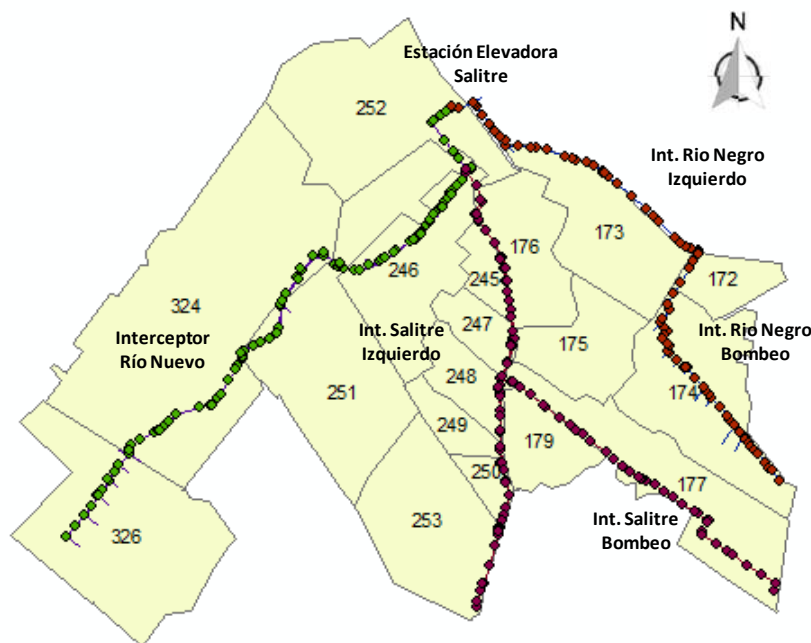
Figura 6-18. Hietograma de diseño, periodo de retorno 100 años, con base en la IDF de la estación Salitre Casa de Bombas.



6.4 Sistema de drenaje de la subcuenca “Salitre Bombeo”

Acorde con lo consignado en EAAB & Consorcio Alcantarillado Ltda. (2011), la subcuenca “Salitre Bombeo” abarca los interceptores Río Nuevo, Izquierdo de Río Negro, Río Negro Bombeo, Salitre Izquierdo y Salitre Bombeo. A este último drenan por la margen izquierda los interceptores Carrera 44 San Fernando y Calle 75B La Libertad, por la margen izquierda los interceptores Transversal 45 Doce de Octubre, Calle 76 Gaitán y Calle 79 Gaitán, los cuales pasan de la margen derecha a la izquierda por medio de tres sifones. El drenaje de la subcuenca Salitre-Bombeo es de tipo combinado, es decir, el drenaje sanitario y pluvial se realiza por medio de una red de alcantarillado. La Figura 6-19 presenta la topología de la red troncal de la red de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.

Figura 6-19. Red de alcantarillado combinado troncal y UGAS de la subcuenca “Salitre Bombeo”. Datos de EAAB & Consorcio Alcantarillado Ltda. (2011) y Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2000).



De acuerdo con EAAB & INGEPAVI LTDA (2011), el cual se considera como el más reciente estudio topológico de la red de alcantarillado de la mencionada subcuenca, las principales características de cada interceptor son:

- **Interceptor Río Nuevo:** De acuerdo con ibíd. “...en el interceptor Río Nuevo se distinguen tres tipos de sección: Tubería circular en la parte inicial del interceptor en sentido aguas abajo, box culvert de una celda en la parte intermedia y box culvert de dos celdas en la parte final del interceptor aguas abajo. El sentido de recorrido del flujo es sur-norte y la pendiente es muy baja debido a que atraviesa una zona plana. El interceptor Río Nuevo sirve las UGAs 246, 251, 324 y 326 de la subcuenca “Salitre Bombeo”.”
- **Interceptor Salitre Izquierdo y Salitre Bombeo:** De acuerdo con ibíd., “...el interceptor Salitre Izquierdo no corresponde a un interceptor independiente, continuo y paralelo al interceptor Salitre Bombeo, sino que corresponde a una serie de manijas que entregan al interceptor Salitre Bombeo por medio de estructuras de alivio. El Interceptor Salitre Izquierdo se encuentra a menor profundidad que el Interceptor Salitre Bombeo, por lo cual, el interceptor Salitre Izquierdo a partir del pozo CMP58772 entrega al interceptor Salitre Bombeo por medio de estructuras de alivio tipo vertedero, las cuales hacen que las aguas de niveles mínimos sean conducidas al bombeo y las aguas que sobrepasan los niveles máximos (rebose) sean entregadas directamente al canal Salitre...El interceptor Salitre izquierdo y Bombeo sirve las UGAs 245, 247, 248, 249, 250, 252 y 253 de la subcuenca “Salitre Bombeo”, presenta una pendiente media y el flujo tiene sentido de recorrido sur-occidente. Adicionalmente se encontró que

existe una sección del interceptor, denominada Salitre Bombeo 2, que es en su mayoría regular en tubería circular y solamente hacía la parte final aguas abajo es de tipo bóveda en ladrillo. El interceptor Salitre Bombeo 2 presenta una pendiente media y su sentido de recorrido del flujo es Oriente-occidente. Éste interceptor entrega sus aportes al interceptor Salitre Bombeo, en el pozo CMP57593 pasando por debajo del canal El Salitre. El interceptor Salitre Bombeo 2 sirve la UGA 177 de la subcuenca Bombeo Salitre.”

- **Interceptor Río Negro Bombeo y Río Negro Izquierdo:** De acuerdo con *ibíd.*... *la sección del interceptor Río Negro Bombeo corresponde a tubería circular, presenta una pendiente media y el sentido de recorrido del flujo es Oriente-Occidente. El interceptor Río Negro entrega sus aportes a la Estación Elevadora El salitre en el pozo CMP44734 ubicado en el predio de la Estación Elevadora. El interceptor Río Negro Bombeo sirve las UGAs 172, 173 y 174 de la subcuenca Bombeo Salitre.”*

6.4.1 Caracterización hidráulica de la subcuenca

Como se estableció previamente, la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” lo componen los interceptores Río Nuevo, Izquierdo de Río Negro y “Salitre Bombeo”, y sobre la mejor topología disponible de estas redes en la EAAB se realizó la modelación matemática para establecer su comportamiento hidráulico. En relación con los caudales a ingresar en la modelación, se tienen en cuenta las consideraciones con las que fueron diseñadas las redes de alcantarillado combinado de acuerdo con el RAS 2000 (MinDesarrollo, 2000), el cual establece la necesidad de establecer las contribuciones de aguas sanitarias y pluviales:

“Dado que en general el caudal de aguas residuales constituye una pequeña fracción del caudal total combinado, el caudal de diseño de los sistemas combinados es igual al caudal de aguas lluvias que llega como escorrentía a los colectores. Sin embargo, cuando el caudal de aguas residuales es mayor que el 5% del caudal de aguas lluvias, debe tomarse como caudal de diseño la suma de los caudales de aguas residuales y aguas lluvias. En este caso, el caudal de aguas residuales se establece con las contribuciones domésticas, industriales, comerciales, institucionales y de infiltración, sin adicionar las conexiones erradas. Es necesario revisar el comportamiento hidráulico de los colectores para las condiciones de caudal mínimo inicial (caudal de tiempo seco inicial)... Los valores máximos y mínimos que gobiernan el diseño de sistemas combinados corresponden a los de redes pluviales.”

- **Caudales residuales de entrada al modelo hidráulico de la subcuenca “Salitre Bombeo”**

Para la implementación de los caudales residuales aportados a las redes del sistema de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” se empleó lo reportado por EAAB & ECI (2010), en el cual se emplearon los estudios de población y demanda realizados para la EAAB por el Consorcio TEA Consultoría y CIC Geomática en 1996. A continuación se describe a grandes rasgos la metodología de consecución de los

caudales residuales para cada una de las UGAS, destacando las de la cuenca “Salitre Bombeo”. De acuerdo con EAAB & ECI (2010) “...el agua no contabilizada continúa siendo apreciable y en la estimación de caudales de aguas residuales se adicionó un 20% correspondiente a este objeto. Se prevé que este valor pueda ser modificado en un futuro, una vez se realicen los análisis correspondientes con base en los estudios que actualmente se encuentra desarrollando la EAAB.” Del mencionado estudio de población y demanda se establecieron los consumos y las dotaciones por habitante según el estrato socioeconómico, Tabla 6-3.

Tabla 6-3. Consumos o Dotaciones Medias Residenciales promedio para Bogotá D.C., CIC TEA (1996) en EAAB & ECI (2010).

Estrato	Personas/ vivienda	Consumo por cuenta m ³ /bimestre	Consumo por persona m ³ /bimestre	Consumo por persona (LHD ¹⁸)
1	5,78	45	7,79	129,76
2	5,78	48	8,30	138,41
3	3,79	43	11,35	189,09
4	3,79	38	10,03	167,11
5	3,1	43	13,87	231,18
6	3,1	50	16,13	268,82

De acuerdo con lo descrito en EAAB & ECI (2010) “...se obtuvo la distribución porcentual de los consumos para diferentes usos de suelo urbano, con base en el consumo total para la ciudad establecido de la facturación de la EAAB, como se presenta en la Tabla No 2. Luego de procesar la información anterior se logra una información detallada y discrimina que se presenta en la Tabla No. 3 denominada “Composición de consumos para diferentes usos del suelo diferentes al residencial.”

Tabla 6-4. Distribución de la demanda promedio según uso del suelo para el área urbana de Bogotá D.C., CIC TEA (1996) en EAAB & ECI (2010).

Uso	% de la demanda
Residencial	78
Comercial	8,6
Industrial	7,75
Institucional	5,65
Total	100

¹⁸ LHD=Litros por habitante día

Tabla 6-5. Composición de consumos para diferentes usos del suelo diferentes al residencial, CIC TEA (1996) en EAAB & ECI (2010).

Clase de uso	% cuentas	% consumo
Inst. educativas y de salud	1.4	10.4
Centro públicos	0.3	3.4
Organismo seguridad	0.4	2.7
Empresas de servicios públicos	0,5	2,8
Entidades oficiales y otras	6.2	6.5
Subtotal institucional	8.8	25.7
Comercio grande	1.2	15.4
Comercio pequeño	81.4	23.7
Sub total comercial	82.7	39.1
Industrial pequeño	0.8	30.3
Industrial grande	7.7	4.8
Industrial total	8.5	35.2
Número de cuentas: 65.597		
Consumo (m ³ /Bimestre) 12'018.348		

De acuerdo con EAAB & ECI (2010), “...del estudio de población se resalta el valor de la población de saturación, la cual es determinada con base en la reglamentación del uso de suelo y densidad de viviendas permitidas para cada uso según la normatividad vigente y en los resultados del último censo de población realizado para a la fecha de elaboración del estudio (i.e. censo 1993)”. En la Tabla 6-14 se presenta el resumen del análisis de la población de saturación.”

Tabla 6-6. Población de saturación para la ciudad de Bogotá D.C., CIC TEA (1996) en EAAB & ECI (2010).

Sectores según desarrollo	POBLACIÓN 1.993		POBLACIÓN SATURACIÓN		NUEVA POBLACIÓN	
	Dentro del perímetro	Bordes	Dentro del perímetro	Bordes	Dentro del perímetro	Bordes
Densificación	1.081.794	487.042	2.859.986	1.653.344	1.778.192	1.166.302
DENS&DESA	25.587		66.541		40954	
Desarrollo	770.922		2.170.681	1.410.629	1.399.759	1.410.629
Demás sectores	3.040.794		3.040.794			
Total	4.919.097	487.042	8.138.002	3.063.973	3.218.905	2.576.931
Total	5.406.139		11.201.975		5.795.836	

Tomando la población de saturación y a partir de la ecuación de proyecciones de población calculada por EAAB & ECI (2010), se determinó que en el año 2051 se alcanza la población de saturación en Bogotá D.C., en donde el caudal residual de saturación corresponde al caudal residual asociado a la máxima demanda poblacional factible en la subcuenca. De acuerdo con esto, se estableció la población de saturación de cada UGA de la subcuenca y su correspondiente caudal de aguas residuales para cada uno de los periodos de análisis como se muestra en la Tabla 6-7.

Tabla 6-7. Caudal residual aportado por las UGAs de la subcuenca “Salitre Bombeo”. Adaptado de EAAB & ECI (2010).

UGA	SubCuencaSanit	T0_Proj	T1_Proj	T2_Proj	T_Satur	VALQ_RES_T 0	VALQ_NO_R ES_T0	Total_Q_Ret_ M3_T0	VALQ_RES_T 1	VALQ_NO_R ES_T1	Total_Q_Ret_ M3_T1	VALQ_RES_T 2	VALQ_NO_R ES_T2	Total_Q_Ret_ M3_T2	VALQ_RES_T Sat	VALQ_NO_R ES_TSat	Total_Q_Ret_ M3_TSat
172	Int R Negro Izq	2010	2020	2030	2051	0.007482	0.000115	0.007597	0.007482	0.000134	0.007616	0.007482	0.000152	0.007634	0.007482	0.000181	0.007663
173	Int R Negro Izq	2010	2020	2030	2051	0.000475	0.013814	0.014289	0.000475	0.016156	0.016631	0.000475	0.018302	0.018777	0.000475	0.021778	0.022253
174	Int R Negro Izq	2010	2020	2030	2051	0.028663	0.021616	0.050279	0.028663	0.025282	0.053945	0.028663	0.028639	0.057302	0.028663	0.034080	0.062742
175	Int Salitre Der	2010	2020	2030	2051	0.021463	0.002490	0.023953	0.021463	0.002913	0.024376	0.021463	0.003299	0.024762	0.021463	0.003926	0.025389
176	Int Salitre Der	2010	2020	2030	2051	0.017384	0.000413	0.017798	0.017384	0.000484	0.017868	0.017384	0.000548	0.017932	0.017384	0.000652	0.018036
177	Int Salitre Der	2010	2020	2030	2051	0.032283	0.022189	0.054473	0.032283	0.025952	0.058235	0.032283	0.029398	0.061682	0.032283	0.034983	0.067266
179	Int Salitre Der	2010	2020	2030	2051	0.012867	0.008249	0.021116	0.012867	0.009648	0.022515	0.012867	0.010930	0.023796	0.012867	0.013006	0.025872
245	Int Salitre Izq	2010	2020	2030	2051	0.009318	0.000000	0.009318	0.009318	0.000000	0.009318	0.009318	0.000000	0.009318	0.009318	0.000000	0.009318
246	Rio_Nuevo	2010	2020	2030	2051	0.038473	0.009334	0.047807	0.038473	0.010916	0.049390	0.038473	0.012366	0.050840	0.038473	0.014715	0.053189
247	Int Salitre Izq	2010	2020	2030	2051	0.011156	0.000000	0.011156	0.011156	0.000000	0.011156	0.011156	0.000000	0.011156	0.011156	0.000000	0.011156
248	Int Salitre Izq	2010	2020	2030	2051	0.012268	0.005375	0.017643	0.012268	0.006287	0.018554	0.012268	0.007122	0.019389	0.012268	0.008474	0.020742
249	Int Salitre Izq	2010	2020	2030	2051	0.010109	0.006352	0.016461	0.010109	0.007429	0.017539	0.010109	0.008416	0.018525	0.010109	0.010014	0.020124
250	Int Salitre Izq	2010	2020	2030	2051	0.006209	0.003901	0.010110	0.006209	0.004563	0.010772	0.006209	0.005169	0.011378	0.006209	0.006150	0.012359
251	Rio_Nuevo	2010	2020	2030	2051	0.059682	0.010029	0.069710	0.061977	0.011729	0.073707	0.064080	0.013287	0.077367	0.067487	0.015811	0.083298
252	Salitre1	2010	2020	2030	2051	0.048542	0.005928	0.054469	0.058702	0.006933	0.065634	0.068008	0.007853	0.075861	0.083087	0.009345	0.092432
253	Int Salitre Izq	2010	2020	2030	2051	0.031144	0.002965	0.034109	0.031144	0.003468	0.034612	0.031144	0.003928	0.035072	0.031144	0.004675	0.035819
324	Rio_Nuevo	2010	2020	2030	2051	0.100751	0.024174	0.124924	0.122036	0.028273	0.150309	0.141534	0.032028	0.173561	0.173125	0.038112	0.211237
326	RioNuevo	2010	2020	2030	2051	0.000000	0.025839	0.025839	0.000000	0.030221	0.030221	0.000000	0.034235	0.034235	0.000000	0.040738	0.040738
Caudales sanitarios totales subcuenca Salitre Bombeo (m³/s)						0.448269	0.162784	0.611053	0.482011	0.190387	0.672398	0.512917	0.215671	0.728588	0.562994	0.256639	0.819634

Donde:

T0_Proyección, T1_Proyección, T2_Proyección y T_Saturación corresponden al año de proyección 2010, 2020, 2030 y el año de saturación 2051 respectivamente.

VAL Q_RES_T: Caudal residual residencial (para cada año de análisis, T)

VAL Q_NO_RES_T: Caudal residual diferente al residencial (para cada año de análisis, T)

Total_Q_Ret_M3_T: Caudal residual total (para cada año de análisis, T)

Todos los caudales se expresan en m³/s.

▪ **Caudales pluviales de entrada al modelo hidráulico de la subcuenca “Salitre Bombeo”**

Para la consecución de los caudales pluviales en la subcuenca de “Salitre Bombeo”, se realizó una revisión del estudio hidrológico contenido en EAAB & HVM (2003) en el cual se definieron las tormentas de diseño y la implementación de un modelo lluvia escurrentía para la estimación de los caudales con diferentes periodos de retorno en las cuencas de Salitre y Jaboque. Según EAAB & HVM (2003), los estimativos se basaron en los resultados del estudio de tormentas EAAB & IRH (1995) y la aplicación del modelo escurrentía EPA SWMM, el cual se empleo para la estimación de la escurrentía generada por las tormentas de diseño. De acuerdo con EAAB & HVM (2003) *“...la aplicación del modelo SWMM estuvo precedida por la calibración del mismo con base en información de campo y los sitios de medición...el ejercicio de la calibración es encontrar un conjunto de parámetros tal que se logre una reproducción satisfactoria de los eventos medidos, para los cuales se ha medido la lluvia y la escurrentía, en una cuenca en la cual se conoce su topología y el funcionamiento de la misma”*. De acuerdo con lo consignado en EAAB & HVM (2003), la información de la cuenca para el modelo se puede dividir en dos grupos: un grupo hace referencia a la geometría y características físicas de los conductos y de las áreas de drenaje, el otro grupo corresponde a los parámetros de las ecuaciones que gobiernan el proceso físico del ciclo hidrológico. El primer grupo está fijado por las características medibles de la cuenca y las características geométricas y topológicas de los elementos del sistema de drenaje. Dentro del segundo grupo se tienen parámetros que de alguna manera pretenden medir características de la cuenca, y que si bien pueden tener una variación espacial, algunos de ellos se suponen constantes en el área.

Tabla 6-8: Primer grupo de parámetros a calibrar para el modelo EPA SWMM (EAAB & HVM, 2003).

Parámetro	Definición	Estimación
A	Área de drenaje aferente a cada pozo	A partir de la información del SIG con una aplicación desarrollada específicamente.
S	Pendiente del terreno	Se hace un plano de la ciudad en donde se tenga una retícula de 100 metros por 100 metros y una pendiente asignada a esta área; para ello se hace un procesamiento con el programa Surfer de las cotas de los pozos que se tienen en la base de datos, y posteriormente se hace un cruce con las áreas aferentes de cada pozo; en esta forma se determinará la pendiente del terreno aferente a cada una de las áreas.
N	Rugosidad de las zonas permeables e impermeables	Este valor representa la rugosidad de los canales idealizados dentro del modelo Runoff y describen parte de la capacidad de evacuación del caudal desde cada una de las áreas. Se asumirá 0.04 para las áreas duras y 0.40 para las áreas permeables. (Asumiendo que la mayor parte de estas deben estar

Parámetro	Definición	Estimación
		recubiertas de pasto).
W	Ancho del área aferente A	Ancho de drenaje del área aferente, relacionado con el tiempo de concentración; se calcula como $\sqrt{\text{Área}}$
C	Medida de la impermeabilidad de la subcuenca	Porcentaje del área impermeable, se relaciona con la escorrentía efectiva. Se determina con una relación con la dureza del suelo.
	Datos de los pozos y los tubos	Para los pozos es necesario introducir las coordenadas x,y. Para los tubos se necesita: – Longitud, tomada de la base de datos, la medida por el sistema de información. – Diámetro, tomado de la base de datos. – Pendiente, tomada de la base de datos; si es 0 ó negativa, se debe corregir. – Rugosidad, se utilizará un valor de 0,016 para todas las tuberías.
	Datos de los pozos y los tubos	En el módulo Extran, además de la información necesaria para el modulo Transport, se requiere la información sobre cotas de entrada y salida de las tuberías en cada uno de los pozos.

Tabla 6-9: Segundo grupo de parámetros a calibrar para el modelo EPA SWMM (EAAB & HNV, 2003).

Parámetro	Función	Cómo se estima
F	Estimación de la Infiltración	$f = f_c + (f_0 - f_c)^{-kt}$
	f_c	Capacidad de infiltración final.
	f_0	Capacidad de infiltración inicial.
	k	Coeficiente de velocidad de saturación.
	t	Tiempo
E	Evaporación	Evaporación
d_p	Pérdidas por retención	Se calcula por fórmula en función de la pendiente en las zonas duras; se asume como 2.5 mm. en las zonas permeables.

En relación con lo descrito por EAAB & HVM (2003), se determinó que los parámetros más relevantes son el ancho (W) y el coeficiente de impermeabilidad (C), por lo que esfuerzos de la calibración se concentraron en estos parámetros. Una vez conocidos el conjunto de parámetros representativos para la subcuenca, se realizó la aplicación de una lluvia de diseño para fines de evaluación de la capacidad para varios períodos de retorno.

Para la subcuenca “Salitre Bombeo”, a partir de las constantes de la curva IDF provista por EAAB & HVM (2003), se estableció la intensidad de la precipitación en cada una de las UGAS de la subcuenca. Para la consecución del caudal pluvial que puede aportar cada UGA en los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años se empleó el método racional; el área de cada UGA y el coeficiente de escorrentía fueron proporcionados por la EAAB, Tabla 6-10 .

Tabla 6-10. Caudal pluvial aportado por las UGAs de la subcuenca “Salitre Bombeo”. Datos de EAAB & H MV (2003).

UGA	SubcuencaID	Area (ha)	Area (m ²)	C	Caudal (m ³ /s)														
					T = 3 años					T = 5 años					T = 10 años				
					0.25	0.5	1	1.5	2	0.25	0.5	1	1.5	2	0.25	0.5	1	1.5	2
172	RioNegro	16.67	166706.16	0.6206	3.93	3.89	3.80	3.72	3.64	4.39	4.34	4.25	4.16	4.07	4.82	4.77	4.67	4.57	4.48
173	RioNegro	50.28	502821.44	0.6134	11.72	11.59	11.33	11.08	10.85	13.09	12.94	12.66	12.39	12.13	14.36	12.94	12.66	12.39	12.13
174	RioNegro	70.05	700487.65	0.3701	9.85	9.74	9.52	9.32	9.12	11.00	10.88	10.64	10.42	10.20	12.07	11.94	11.69	11.45	11.22
175	Salitre	33.22	332228.42	0.6257	7.26	7.18	7.04	6.91	6.77	7.87	7.80	7.65	7.51	7.38	8.57	8.50	8.35	8.20	8.06
176	Salitre	37.06	370584.23	0.6200	8.02	7.94	7.78	7.63	7.49	8.70	8.62	8.46	8.30	8.15	9.47	9.39	9.22	9.06	8.91
177	IntSalitreBombeo	63.42	634249.60	0.6241	13.82	13.68	13.41	13.15	12.90	14.99	14.85	14.57	14.31	14.05	16.32	16.18	15.89	15.62	15.35
179	Salitre	23.55	235520.01	0.6243	5.13	5.08	4.98	4.88	4.79	5.57	5.52	5.41	5.31	5.22	6.06	6.01	5.90	5.80	5.70
245	Salitre	10.25	102487.82	0.6213	2.22	2.20	2.16	2.12	2.07	2.41	2.39	2.34	2.30	2.26	2.63	2.60	2.56	2.51	2.47
246	RioNuevo	52.09	520866.85	0.6221	10.92	10.81	10.60	10.39	10.20	12.00	11.89	11.67	11.46	11.26	13.36	13.25	13.03	12.81	12.60
247	Salitre	13.87	138659.21	0.6201	3.00	2.97	2.91	2.86	2.80	3.26	3.23	3.17	3.11	3.05	3.55	3.51	3.45	3.39	3.33
248	Salitre	18.08	180847.03	0.6210	3.92	3.88	3.80	3.73	3.66	4.25	4.21	4.13	4.06	3.99	4.63	4.59	4.51	4.43	4.35
249	Salitre	12.71	127057.68	0.6213	2.76	2.73	2.67	2.62	2.57	2.99	2.96	2.91	2.85	2.80	3.26	3.23	3.17	3.11	3.06
250	Salitre	8.33	83323.70	0.6240	1.82	1.80	1.76	1.73	1.69	1.97	1.95	1.91	1.88	1.85	2.14	2.12	2.09	2.05	2.02
251	RioNuevo	100.27	1002722.37	0.6202	20.96	20.75	20.34	19.95	19.57	23.02	22.81	22.40	22.00	21.61	25.65	25.43	25.00	24.59	24.19
252	Salitre	84.58	845838.98	0.6209	18.33	18.15	17.79	17.45	17.11	19.89	19.70	19.33	18.98	18.64	21.66	21.46	21.08	20.72	20.36
253	Salitre	62.21	622119.27	0.6195	13.45	13.32	13.06	12.80	12.56	14.60	14.46	14.19	13.93	13.68	15.89	15.75	15.47	15.20	14.94
324	RioNuevo	184.92	1849241.20	0.6221	38.77	38.38	37.62	36.90	36.20	42.59	42.20	41.43	40.69	40.69	47.44	47.04	46.25	45.49	44.75
326	RioNuevo	97.39	973860.30	0.3090	10.14	10.04	9.84	9.65	9.47	11.14	11.04	10.84	10.64	10.46	12.41	12.30	12.10	11.90	11.71
Caudales pluviales totales subcuenca Salitre Bombeo (m ³ /s)					186.02	184.12	180.43	176.88	173.46	203.72	201.77	197.97	194.31	191.49	224.30	221.01	217.10	213.31	209.65

Tabla 6-11. Parámetros de la curva IDF para calcular la intensidad media para las UGAS en la subcuenca “Salitre Bombeo”. Datos de EAAB & H MV (2003).

INTERCEPTOR	Este (m)	Norte (m)	PERÍODO DE RETORNO, T (AÑOS)																	
			3			5			10			25			50			100		
			C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Salitre	99754	107568	4337.50	26.30	1.08	5262.80	28.30	1.09	6360.90	30.20	1.10	7986.10	32.40	1.11	8763.00	33.10	1.10	10086.20	34.50	1.11
RioNegro	102147	108452	3224.20	21.90	1.02	3398.80	22.00	1.00	3880.70	22.90	1.00	4325.50	23.40	0.99	4849.10	24.20	0.99	5149.50	24.30	0.98
RioNuevo	98581	108466	4397.70	26.70	1.09	5525.40	29.30	1.10	7040.30	32.10	1.11	8138.90	33.50	1.11	9257.20	34.80	1.11	10898.90	36.60	1.12

6.4.2 Evaluación hidrodinámica de las áreas de posible encharcamiento en la subcuenca

La evaluación hidrodinámica de las áreas factibles de encharcamiento en la subcuenca “Salitre Bombeo” se realizó empleando el software Iber en su modulo hidrodinámico. El software Iber requiere como insumo para el cálculo información topográfica de detalle, en tanto la calidad de esta información determina en gran medida la veracidad de los procesos a modelar y la certeza de los resultados a obtener. El procesamiento de la información topográfica implementada en Iber para la aplicación en la subcuenca “Salitre Bombeo” se muestra en detalle en el numeral 6.7.1. Para la implementación del software Iber en la modelación hidrodinámica y en la consecución del mapa de amenaza por encharcamiento de la subcuenca, se siguió el procedimiento descrito en el Anexo C.

Como resultado de las simulaciones hidrodinámicas con el software Iber, se obtuvieron los mapas de profundidad, velocidad y duración de la inundación. Como ejemplo de uno de estos resultados, la Figura 6-20 muestra el mapa de profundidad proveniente de la simulación hidrodinámica realizada con el modelo Iber, que incluye la modelación de la precipitación sobre la cuenca de estudio y del caudal sobre el terreno de los pozos que presentan refluo de caudal hacia la superficie, por encontrarse el tramo del sistema trabajando a presión y cuya magnitud proveniente de la simulación con el modelo EPA SWMM 5.0. La información contenida en estos mapas es de gran utilidad en la consecución del valor de los indicadores relacionados con los efectos de la profundidad, duración y velocidad de la inundación contenidos en los indicadores de vulnerabilidad humana contenidos en la evaluación de la vulnerabilidad social y de los indicadores de vulnerabilidad de las edificaciones contenidos en el análisis de la vulnerabilidad física del área de estudio. Los mencionados mapas se encuentran en el Anexo F y los archivos resultados de las simulaciones hidráulicas e hidrodinámicas se encuentran contenidos en el Anexo D.

En la Figura 6-20 se observan las áreas de la subcuenca en donde se presentan las mayores profundidades. Se observa que el eje de la Avenida del Congreso Eucarístico (i.e. Avenida Carrera 68) y el eje del canal Salitre se ven afectados por calados altos, no obstante la situación más crítica es el caso de la Avenida del Congreso Eucarístico debido que en este corredor no existe un canal a cielo abierto al cual poder aliviar los excesos, situación que sí ocurre en el eje del Canal Salitre.

- **Antropobarreras en el sistema de alcantarillado**

El sistema de alcantarillado troncal combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” se compone de redes completamente intervenidas antrópicamente, es decir, toda la topología de la red de drenaje ha sido modificada por el ser humano en tanto no existen en la actualidad cauces naturales en la subcuenca que no hayan sido intervenidos. En este sentido, la red troncal de alcantarillado se compone de tuberías, canales artificiales y estructuras hidráulicas, que tienen como punto de concentración la Estación Elevadora Salitre, como fue descrito en el numeral 6.4. En busca de establecer la cantidad y posición de antropobarreras que alteran el correcto funcionamiento del sistema de alcantarillado se realizó la revisión de la información provista por la EAAB de las mencionadas estructuras, seguido de un reconocimiento en campo realizado el 11 de febrero de 2012. A los tramos afectados se les asigna un valor, en representación de la mayor vulnerabilidad que sufren. Se estableció que la presencia de antropobarreras en los siguientes puntos afecta el funcionamiento del sistema:

- **Adecuación hidráulica del canal Salitre en la Av. Carrera 68 con Calle 90:** Debido a la baja pendiente de la zona y las bajas velocidades que se presentan, la EAAB buscó incentivar el flujo en la zona por medio de una adecuación hidráulica del canal Salitre en la confluencia con el canal río Negro. Para marzo de 2012 se observan en el lecho del canal materiales de construcción sueltos, obstrucciones (i.e. especialmente bajo el puente) y debilitamiento de los taludes.

Fotografía 6-1. Canal Salitre en la confluencia con el canal río Negro y el alivio de la Carrera 68. Fotografía 19/10/2011. EAAB.



- **Alivio canal Salitre en la Av. Carrera 68 con Calle 90:** Debido a la adecuación hidráulica realizada en el canal Salitre para procurar una mejor conducción en época de aguas bajas, la entrega del alivio del sistema de tuberías del alcantarillado combinado al canal Salitre ha quedado por debajo del nivel del canal, por consiguiente la estructura de alivio no funciona correctamente y las aguas del canal Salitre son conducidas dentro de las tuberías del sistema de alcantarillado, es decir funciona en sentido inverso, Fotografía 6-2.

Fotografía 6-2. Canal Salitre en la confluencia con el canal Río Negro y el alivio de la Carrera 68. Fotografía 19/10/2011. EAAB.



El canal de comunicación entre el canal Salitre y la estructura de alivio permanece con aguas combinadas que no drenan, Fotografía 6-3, por lo cual se ha convertido en un foco insalubre y que requiere de mantenimiento permanente por parte de la EAAB.

Fotografía 6-3. Alivio canal Salitre con Carrera 68. Recorrido de campo 11/02/2012.



Para febrero de 2012, se habían dispuesto soluciones temporales por parte de la EAAB para el control del reflujo hacia el alivio por medio de sacos de material, Fotografía 6-4.

Fotografía 6-4. Soluciones provisionales al reflujo del alivio en el canal Salitre con Carrera 68. Recorrido de campo 11/02/2012.



Para marzo de 2012 el canal de alivio contenía una considerable cantidad de sedimentos en forma de lodos y los sacos de material fallaron, por lo cual se realizó un proceso de limpieza por parte de la EAAB, Fotografía 6-5.

Fotografía 6-5. Acciones de limpieza en el canal de alivio hacia el canal Salitre con Carrera 68. Visita 13/03/2012.



- **Estación elevadora Salitre:** La planta elevadora Salitre se localiza en la Avenida Carrera 68 con Calle 80, costado occidental, detrás del establecimiento Homecenter. Su óptimo funcionamiento es definitivo en el desempeño de todo el sistema de la subcuenca “Salitre Bombeo”, debido a que actúa como punto de concentración de todas las aguas que son conducidas por medio de las tuberías del sistema de alcantarillado combinado de la subcuenca, exceptuando las aguas combinadas que son conducidas por alivios hacia los canales. No obstante, debido al incorrecto funcionamiento de alivios tan importantes como el alivio al canal Salitre en la Carrera 68, el correcto funcionamiento de la planta cobra una importancia mayor.

Fotografía 6-6. Vista del exterior de la Planta elevadora Salitre. Recorrido de campo 11/02/2012.



De acuerdo con EAAB & INGEPAVI LTDA. (2011), la llegada de los interceptores y la estación elevadora Salitre se caracterizan por¹⁹:

- El interceptor Río Negro Bombeo, cruza por debajo el canal Salitre entre los pozos CMP44693 y CMP44760, este último se conecta con el pozo CMP44734. Desde este punto continúa una sección tipo box culvert y pasa por el pozo NP026. Después del pozo NP026 el box culvert toma hacia la izquierda en forma de curva y después hacia la derecha para ingresar a la estación.
- El interceptor Río Nuevo, entrega a la planta elevadora salitre en un box culvert de dos (2) celdas, que inicia en la estructura CET116, ubicada en el costado nororiental de la calle 80 con carrera 68. La sección de dos celdas se mantiene hasta el pozo NP013 (i.e. calle 66 con carrera 68B), en este punto el box culvert se reduce a una sola celda, se mantiene la celda izquierda (sentido del flujo) que continúa en dirección sur-occidente.
- En cuanto al interceptor Salitre Izquierdo, este recibe las aguas del interceptor Río Negro en el pozo NP029, que es la llegada de una estructura tipo sifón proveniente del pozo CMS49293 ubicado en el costado norte del canal Salitre. El pozo NP029 se conecta al interceptor Salitre Izquierdo por medio de un box culvert en concreto antes de llegar al pozo CMC146749, punto en el cual el interceptor Salitre Izquierdo se amplía a un box culvert con dos celdas.
- Dentro de la estación elevadora Salitre el box llega a una primera cámara hexagonal que posee una compuerta a la entrada, tiene además otras dos compuertas que regulan el paso del agua a una segunda cámara (tipo piscina) en la que se regula el paso por dos compuertas que comunican con los tornillos. La

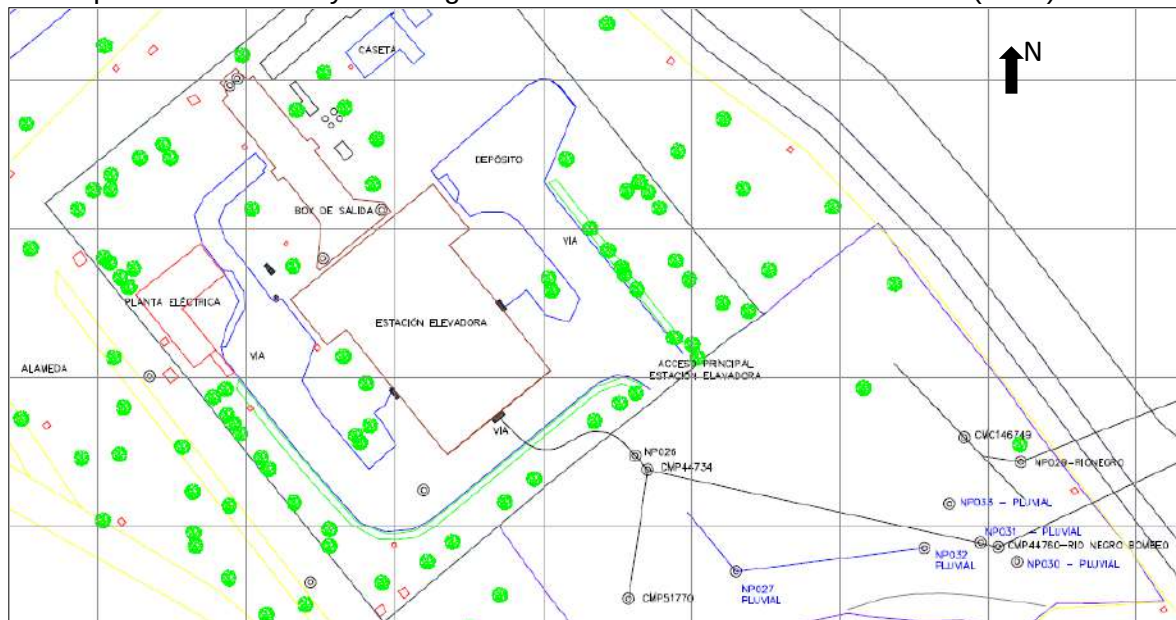
¹⁹ Para ampliar esta información se recomienda revisar los anexos del estudio EAAB & INGEPAVI LTDA. (2011), en donde se pueden observar cada una de las fichas de campo en las cuales se registran todos los detalles de los pozos encontrados, un perfil topográfico en el cual se muestra el recorrido del agua desde la llegada en el pozo CMP44734 hasta la salida en el box culvert y el plano general del levantamiento topográfico detallado de la estación elevadora Salitre.

estación elevadora cuenta con 6 tornillos que se encargan de transportar el agua de la parte más baja a la más alta y la entregan a un box culvert el cual se convierte en la salida de las aguas desde la estación elevadora y son entregadas aguas abajo al interceptor Salitre Izquierdo.

Fotografía 6-7. Vista del interior de la Planta elevadora Salitre. EAAB & INGPAVI LTDA. (2011).



Figura 6-21. Configuración en planta de la Estación elevadora El Salitre y llegada de los interceptores Río Nuevo y Río Negro Bombeo. EAAB & INGPAVI LTDA. (2011).



De acuerdo con lo expresado previamente, se localizaron las mencionadas antropobarreras en el mapa de redes de la subcuenca y se tuvieron en cuenta para el análisis de capacidad del sistema de alcantarillado del numeral 6.7.1.

▪ Sedimentos en el sistema de alcantarillado de la subcuenca

En la presente aplicación de la metodología no se realiza una cuantificación de los sedimentos que se encuentran en el sistema de alcantarillado, toda vez que la determinación de este parámetro no se encuentra dentro de los objetivos de la investigación. No obstante se destaca que la implementación de la metodología se verá beneficiada por la consecución de este parámetro toda vez que la modelación hidrodinámica no deberá considerarse completa sin este componente. En la presente implementación se busca identificar aquellos vectores relacionados con sedimentos que pueden incrementar la vulnerabilidad en la subcuenca “Salitre Bombeo”.

La subcuenca “Salitre Bombeo” presenta una de las problemáticas sanitarias más recurrente en Bogotá D.C., la disposición de residuos sólidos en áreas públicas. A pesar que en este aspecto la cultura ciudadana ha sido promovida por múltiples medios, aún se presenta la mala práctica de la acumulación de residuos especialmente en esquinas poco transitadas y en andenes, lo que incrementa la posibilidad de que alguno de estos materiales tapone la entrada de los sumideros en las vías, Fotografía 6-8.

Fotografía 6-8. Disposición de residuos sólidos en vía pública, UPZ Las Ferias. Recorrido de campo 11/02/2012.



Al ser el alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo” de tipo combinado, otra acumulación de sedimentos se debe a la formación de lodos y su depositación en la base de los conductos, especialmente en aquellos de poca pendiente donde las velocidades generalmente no alcanzan lo recomendado para auto limpieza del sistema (i.e. 0.5 m/s, según MinDesarrollo (2000)). La situación de taponamiento de conductos del sistema se hace frecuente en los tramos urbanos con actividad comercial e industrial, en donde las disposiciones de aguas servidas contienen altas cantidades de grasas y otros residuos, por lo cual estos tramos deberán tener una consideración especial en cuanto a las jornadas de limpieza de la EAAB y ejercer la veeduría del correcto funcionamiento de las trampas de grasas de los establecimientos, entre otras medidas de control de disposición. El recorrido realizado en febrero de 2012, hizo evidente la presencia de lodos y residuos sólidos remanentes de construcción en los canales de la subcuenca, los

cuales dan un aspecto poco deseable a los ríos internos de la ciudad, lo que hace que sus alrededores sean poco visitados, Fotografía 6-9y Fotografía 6-10.

Fotografía 6-9. Acumulación de lodos y residuos sólidos en el canal Salitre. Recorrido de campo 11/02/2012.



Fotografía 6-10. Residuos sólidos remanentes de construcción en la confluencia del canal río Negro con el canal Salitre. Recorrido de campo 11/02/2012.



- **Conexiones erradas en el sistema de alcantarillado**

La afectación por conexiones erradas en el sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo” es una temática implícita, debido a que se trata de un sistema de alcantarillado de tipo combinado.

- **Evaluación de la capacidad hidráulica de la red de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo”**

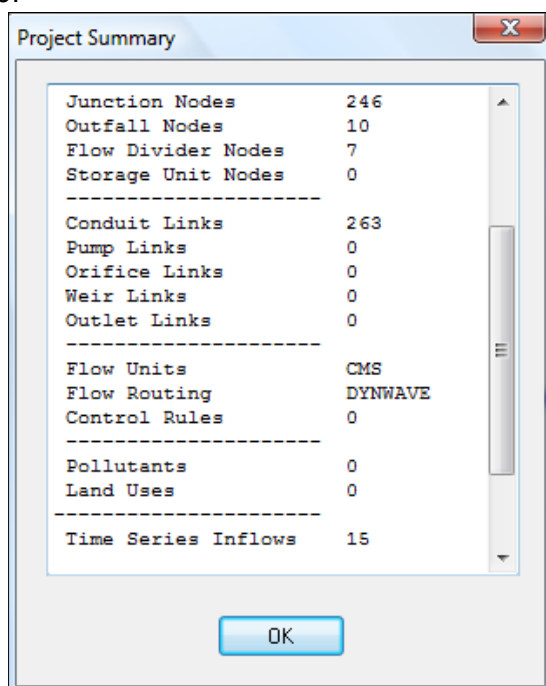
Empleando el modelo EPA SWMM 5.0, la topología de las redes de alcantarillado combinado provistas por la EAAB y los caudales factibles de consecución en la red de

alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” para cada escenario de análisis (i.e. escenario actual, 2020, 2030 y 2051), se procede a ingresar los datos en el software y establecer su respuesta hidráulica mediante simulaciones de funcionamiento de la red de alcantarillado de la red troncal. Se considera que este ejercicio corresponde a una etapa de simulación de la respuesta hidráulica del sistema tomando como insumo los parámetros hidráulicos y topológicos de la red previamente calibrados por los mencionados estudios de la EAAB, en tanto dentro de los alcances de la presente aplicación no se encuentra el de calibración de parámetros. De acuerdo con lo planteado en el Capítulo 5, se establece la respuesta de la capacidad hidráulica del sistema empleando el caudal combinado, con el objeto de establecer su capacidad hidráulica.

- **Estructura y elementos del sistema de alcantarillado troncal en EPA SWMM 5.0**

La topología empleada en la simulación del funcionamiento hidráulico del sistema de alcantarillado troncal combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” en EPA SWMM 5.0, tiene 246 nodos, 10 estructuras de descarga, 9 estructuras de alivio, 263 conductos o redes, y 15 series de tiempo. En la Figura 6-22 se muestra el reporte de componentes del sistema.

Figura 6-22. Reporte de la topología de la subcuenca “Salitre Bombeo” ingresada en el modelo EPA SWMM 5.0.



- **Puntos de entrada en EPA SWMM 5.0**

En el modelo se ha destinado un pozo para las entradas de cada uno de los caudales provenientes de las UGAs de la subcuenca, Figura 6-23.

Figura 6-23. Entradas de caudal al modelo hidráulico de la subcuenca “Salitre Bombeo” en el modelo EPA SWMM 5.0.

[INFLOWS]				
;;				
Node	Parameter	Time Series	Concen /Mass	Conversion Factor

CMID123	FLOW	Caudal-UGA-249	FLOW	1.0
CMID133	FLOW	Caudal-UGA-247	FLOW	1.0
CMID143	FLOW	Caudal-UGA-252	FLOW	1.0
CMP55314	FLOW	Caudal-UGA-326	FLOW	1.0
CMP56399	FLOW	Caudal-UGA-246	FLOW	1.0
CMP56960	FLOW	Caudal-UGA-251	FLOW	1.0
CMP57294	FLOW	Caudal-UGA-174	FLOW	1.0
CMP57387	FLOW	Caudal-UGA-324	FLOW	1.0
CMP57705	FLOW	Caudal-UGA-248	FLOW	1.0
CMP58150	FLOW	Caudal-UGA-179	FLOW	1.0
CMP58772	FLOW	Caudal-UGA-177	FLOW	1.0
S-CEA154	FLOW	Caudal-UGA-173	FLOW	1.0
S-CEA156	FLOW	Caudal-UGA-172	FLOW	1.0
S-CEA158	FLOW	Caudal-UGA-176	FLOW	1.0
S-CEA160	FLOW	Caudal-UGA-175	FLOW	1.0

○ **Puntos de salida y condiciones de control en EPA SWMM 5.0**

El modelo implementado tiene 10 puntos de salida de caudal correspondientes a la descarga a la Estación Elevadora Salitre y 9 estructuras de alivio, cuyo reporte se presenta en la Figura 6-24.

Figura 6-24. Salidas de caudal del modelo hidráulico de la subcuenca “Salitre Bombeo” en el modelo EPA SWMM 5.0.

[OUTFALLS]				
;;				
Name	Invert Elev.	Outfall Type	Stage/Table Time Series	Tide Gate

S-CEA156	2541.72	FREE		NO
S-CEA154	2543.57	FREE		NO
S-CEA165	2542.51	FREE		NO
S-CEA167	2541.62	FREE		NO
S-CEA164	2543.22	FREE		NO
S-CEA161	2541.40	FREE		NO
S-CEA160	2544.28	FREE		NO
S-CEA158	2543.01	FREE		NO
S-CEA152	2540.11	FREE		NO
S-Bombeo	2537.91	FREE		NO

La estructura de entrega a la Estación Elevadora Salitre está identificada como S-Bombeo y su descarga es libre, al igual que las 9 estructuras de alivio denominadas CEA. La simulación se realizó utilizando onda dinámica, para lo cual el software resuelve las ecuaciones de Saint Venant, permitiendo modelar el flujo a presión cuando el caudal excede la capacidad de la tubería, identificando remansos y estructuras hidráulicas especiales con varias salidas y entradas. El modelo emplea la ecuación de Manning para relacionar el caudal con la profundidad y la pendiente de fricción, y cuando las tuberías se presurizan aplica la ecuación de Darcy-Weisbach.

○ **Resultados de las simulaciones de la red de alcantarillado con EPA SWMM 5.0**

Las simulaciones realizadas presentan en promedio un error en la ecuación de continuidad del 0.001%. Los caudales que se ingresaron al modelo a través de las UGAs fueron caudales residuales (i.e. caudales supuestos en tiempo seco) y caudales combinados (i.e. caudales supuestos en tiempo húmedo, es decir caudal residual y caudal pluvial), corresponden a los estimados en el numeral 6.4.1 para cada periodo de retorno. En el Anexo Digital se incluyen los archivos de las simulaciones en EPA SWMM 5.0 para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, tanto para caudales residuales (i.e. comportamiento del sistema combinado en tiempo seco) como para caudales combinados (i.e. comportamiento del sistema en tiempo húmedo).

Debido a que el escenario más frecuente en la subcuenca “Salitre Bombeo” consiste en eventos de precipitación de pequeño periodo de retorno (i.e. TR 3 años) y con caudales combinados, a continuación se realiza una interpretación de los resultados de la simulación hidráulica con EPA SWMM 5.0. La Figura 6-25 muestra el reporte de conservación de la masa en la simulación hidráulica con caudal combinado para el periodo de retorno de 3 años en el sistema troncal combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.

Figura 6-25. Conservación de la masa del modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.

*****	Volume	Volume
Flow Routing Continuity	hectare-m	Mliters
*****	-----	-----
Dry Weather Inflow	0.000	0.000
Wet Weather Inflow	0.000	0.000
Groundwater Inflow	0.000	0.000
RDII Inflow	0.000	0.000
External Inflow	1410.154	14101.689
External Outflow	581.327	5813.330
Surface Flooding	826.627	8266.355
Evaporation Loss	0.000	0.000
Initial Stored Volume	0.000	0.000
Final Stored Volume	2.192	21.924
Continuity Error (%)	0.001	

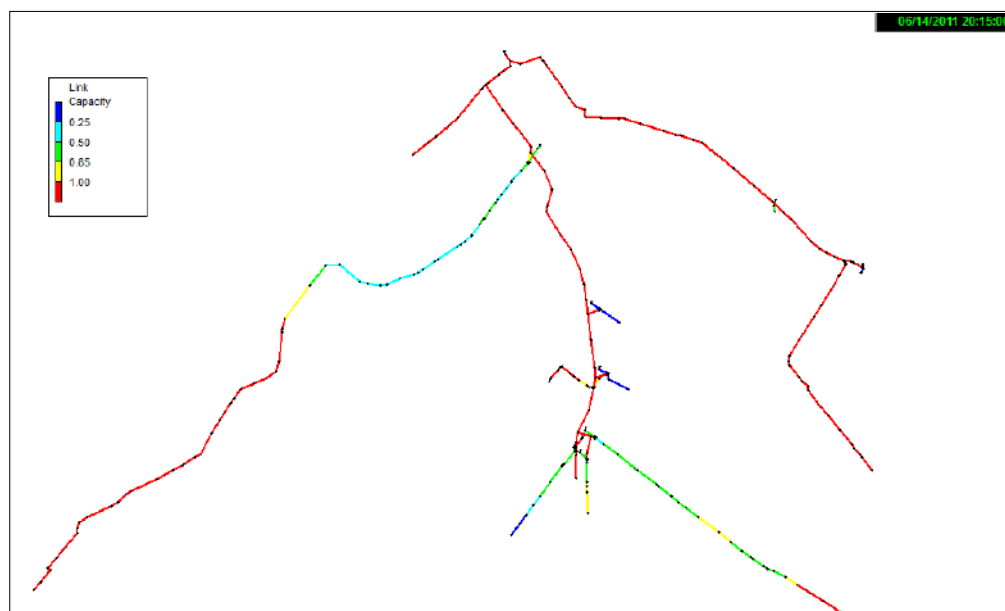
La estructura de alivio que descarga mayor caudal al sistema pluvial es la CEA152 localizada en el interceptor Río Nuevo a la altura de Carrera 54A con Calle 80D, la cual como se mostró en el numeral de antropobarreras, debido a que actualmente presenta un funcionamiento errado, Figura 6-26.

Figura 6-26. Caudales totales de entrada y salida del modelo hidráulico con caudal combinado, TR 3 años, con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.

***** Outfall Loading Summary *****				
Outfall Node	Flow Freq. Pcnt.	Avg. Flow CMS	Max. Flow CMS	Total Volume 10 ⁶ ltr
S-CEA156	16.80	0.040	0.040	3.456
S-CEA154	16.80	0.325	0.325	28.077
S-CEA165	16.80	0.055	0.055	4.711
S-CEA167	16.80	0.154	0.154	13.264
S-CEA164	16.80	0.115	0.115	9.787
S-CEA161	16.80	0.041	0.041	3.502
S-CEA160	16.80	0.109	0.109	9.417
S-CEA158	16.80	0.084	0.084	7.257
S-CEA152	16.80	0.981	0.986	82.306
S-Bombeo	16.80	2.336	2.356	197.135
System	16.80	4.240	4.262	358.911

En la Figura 6-27 se observa la escala gráfica la capacidad a la cual opera cada tubería de acuerdo con los caudales suministrados por la EAAB. Por capacidad de operación se define la relación entre la capacidad hidráulica del conducto y la profundidad normal del flujo dentro del conducto. Se destaca que aquellos conductos con valor 1, en donde la capacidad del conducto iguala la profundidad normal del flujo están trabajando a presión, por lo cual la vulnerabilidad funcional aumenta al trabajar en una condición diferente para la cual ha sido diseñada.

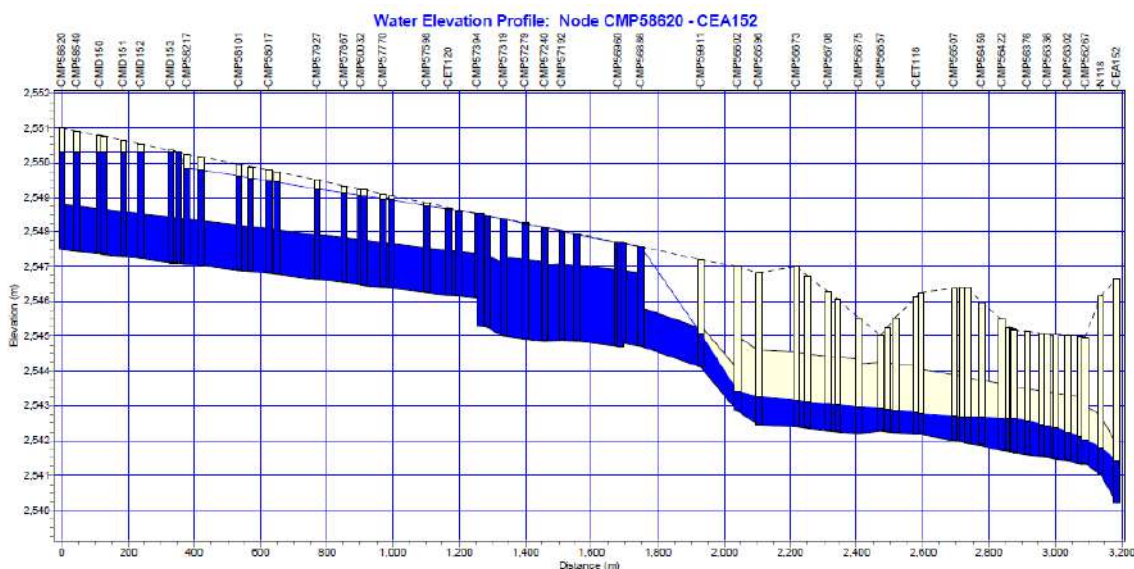
Figura 6-27. Capacidad de operación de la red troncal combinada de la cuenca “Salitre Bombeo” con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0, con caudales combinados TR 10 años.



En la Figura 6-28 se muestra el perfil del interceptor Río Nuevo en la simulación de caudal combinado con todas las UGAs aportando para la lluvia de diseño de periodo de retorno de 3 años. El interceptor Río Nuevo drena en sentido sur – norte. Se destaca que a lo largo del interceptor Río Nuevo no existen alivios de caudal, por lo cual, el caudal combinado es colectado en este interceptor y entregado al interceptor Izquierdo Salitre y sus excesos derivados al Canal Salitre a través de la estructura de alivio CEA152.

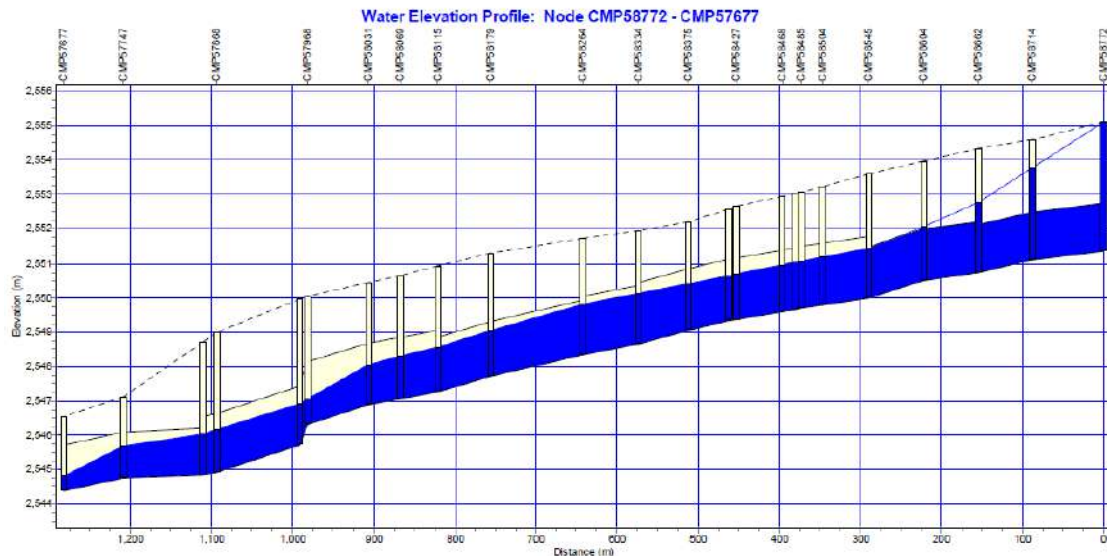
En la Figura 6-28 se observa que para un caudal combinado de periodo de retorno de 3 años, el sistema del interceptor Río Nuevo trabaja con las tuberías a presión en el tramo comprendido entre los pozos CMP58620 y CMP58886. La situación se agrava en los pozos CMID153, CMP58217 y los contenidos en el tramo CET120 - CMP58886 los cuales presentan refluo de caudal a la vía. Aguas abajo del pozo CMP58886 y hasta la estructura de alivio CEA152 el sistema funciona a flujo libre. No obstante, como se presentó en el numeral 6.5.1, el alivio del interceptor Río Nuevo al canal Salitre (i.e. CEA 152) está actualmente funcionando en forma inadecuada debido a que permite la entrada de agua proveniente del canal Salitre al sistema de tuberías del interceptor.

Figura 6-28. Perfil del interceptor Río Nuevo, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.



En la Figura 6-29 y la Figura 6-30 se muestran los perfiles del interceptor Salitre Bombeo y el interceptor Izquierdo Salitre. El interceptor Salitre Bombeo, drena de oriente a occidente iniciando en el pozo CMP58772 y finalizando en el pozo CMP57677 en la entrega al interceptor Izquierdo Salitre. Entre el inicio y el pozo CMP58604 el sistema trabaja a presión para los caudales de periodo de retorno de 3 años y en el pozo CMP58772 se presenta refluo de caudal hacia la vía. Siguiendo hacia aguas abajo del pozo CMP58604 y hasta la entrega del interceptor Salitre Bombeo en el alivio CEA164 al Canal Salitre, el sistema opera a flujo libre.

Figura 6-29. Perfil del interceptor Salitre Bombeo, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.



El interceptor Izquierdo Salitre drena en sentido suroriente-noroccidente, inicia en el pozo CMP57920 y finaliza en el pozo CMP44665 entregando a la Estación Elevadora Salitre. En su recorrido recibe los caudales provenientes del interceptor Salitre Bombeo y del interceptor Río Nuevo. En la Figura 6-30 se observa que para caudales combinados de periodo de retorno de 3 años las tuberías del interceptor funcionan a presión, por lo cual entran a trabajar las estructuras de alivio CEA167, CEA165, CEA161, CEA160 y CEA 158 hacia el Canal Salitre. Se destaca que este es un interceptor muy profundo, en donde el pozo más superficial se encuentra a 5 metros de distancia entre la cota de terreno y la cota de batea.

Figura 6-30. Perfil del interceptor Izquierdo Salitre, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.

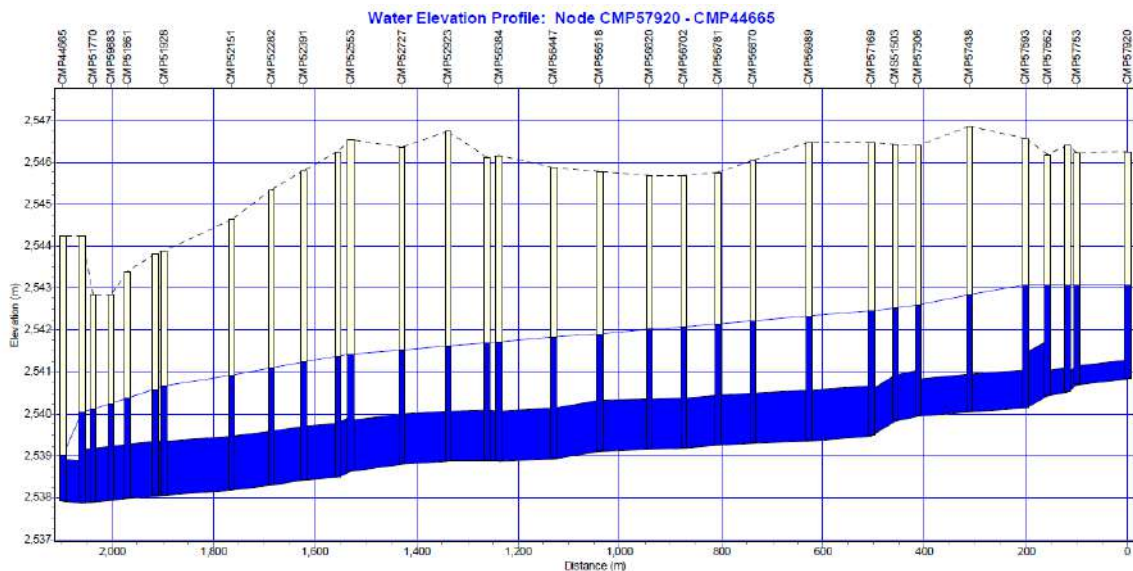
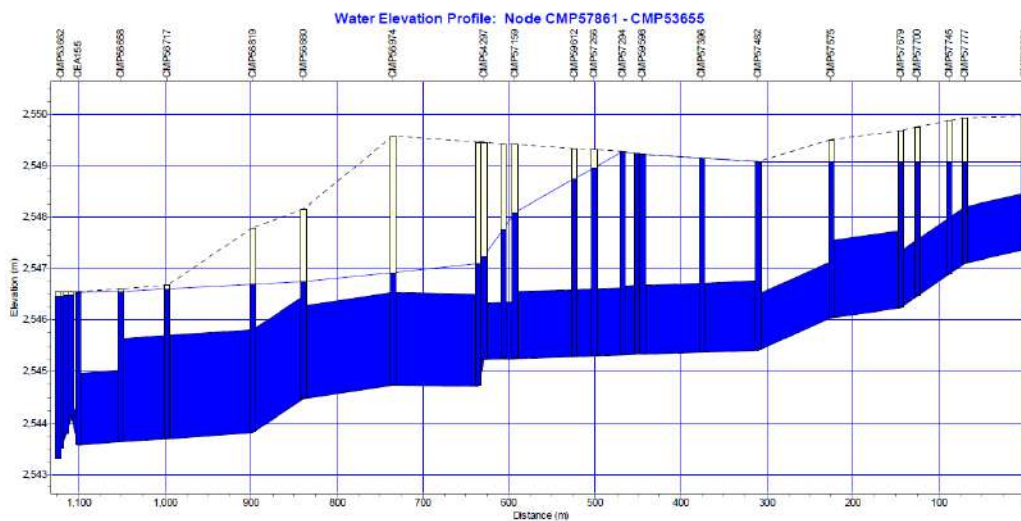
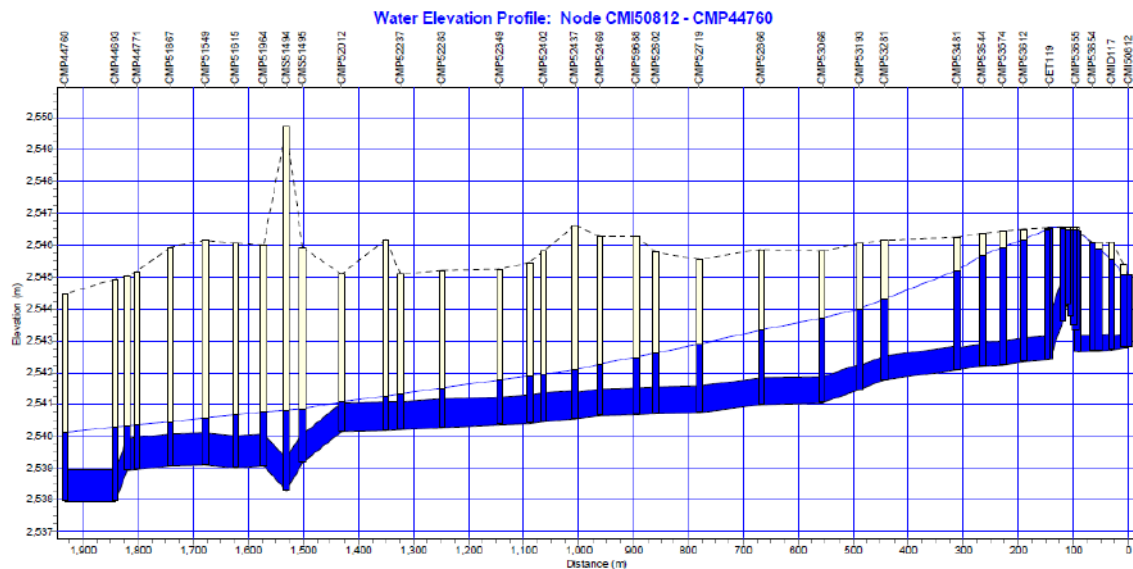


Figura 6-31. Perfil del interceptor Río Negro Bombeo, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.



Con relación al interceptor Izquierdo Río Negro, Figura 6-32, este drena de oriente a occidente, recoge las aguas del interceptor Río Negro Bombeo y entrega a la Estación Elevadora Salitre por medio de un sifón. En el interceptor izquierdo Río Negro los excesos son direccionados por medio del alivio CEA 156 y CEA 154 hacia el Canal Río Negro. Para caudales combinados de periodo de retorno de 3 años el interceptor Izquierdo Río trabaja a presión y se presenta refluo de caudal hacia la vía entre los pozos CMP53655 y CET119. Es de destacar que aguas debajo del pozo CMP53281 y hasta la entrega en la Estación Elevadora Salitre, el interceptor Izquierdo Río Negro es un sistema profundo, en donde el pozo más superficial se encuentra a 4 metros de profundidad medido desde la cota de terreno y hasta la cota de batea.

Figura 6-32. Perfil del interceptor Izquierdo Río Negro, caudal combinado, simulación TR 3 años con el modelo hidráulico EPA SWMM 5.0.



Este análisis de los perfiles de los interceptores de la subcuenca permite clarificar el funcionamiento a lo largo del sistema troncal de la subcuenca y establecer pozos a través de los cuales existe reflujo de caudal hacia la superficie, información que complementa el análisis de amenaza pluvial, descrito en el numeral 6.4.1, Evaluación hidrodinámica de las áreas factibles de encharcamiento en la subcuenca “Salitre Bombeo”.

- **Estructuras de alivio en el sistema de alcantarillado troncal combinado**

Cuando las áreas servidas fueron creciendo y la escorrentía llegó a valores importantes se hizo clara la necesidad de contar con estructuras de alivio, esto es, estructuras localizadas en puntos estratégicos de la red de alcantarillado y que permiten el paso de las aguas residuales en tiempo seco sin limitación alguna, pero que cuando se presentan eventos de lluvia permiten el rebose a los canales o corrientes superficiales de los excesos que no puede manejar la red de alcantarillado. De acuerdo con EAAB & HMV. (2003), el caudal de diseño del elemento de la red de alcantarillado inmediatamente aguas abajo de estas estructuras se seleccionaba como un 120% del caudal de diseño residual, esto quiere decir que si durante un evento de lluvia la suma de los aportes de escorrentía más las aguas residuales que circulan por la red de alcantarillado excedían el 120% del caudal máximo esperado de aguas residuales, se produciría un vertimiento al canal o a la corriente superficial, con aguas residuales diluidas en mayor o menor proporción dependiendo de la intensidad de la lluvia.

Desafortunadamente, las estructuras de alivio son muy difíciles de mantener, muchas veces porque sus accesos han sido obstruidos por las repavimentaciones de las vías donde están localizadas o por otras razones que escapan de este análisis. Como consecuencia de esto, el elemento que permite el paso de las aguas residuales en

tiempo seco se taponan y se producen vertimientos de aguas residuales a los canales permanentemente, dando así un aspecto indeseable a los canales de la ciudad. Adicionalmente, las aguas residuales vertidas a los canales no llegan a los interceptores que alimentan la planta de tratamiento del Salitre y contaminan entonces no solamente los canales en su zona urbana, sino también el río Bogotá, contribuyendo así a la justificación del cobro de las tasas retributivas por la Autoridad Ambiental competente.

De acuerdo con EAAB & HMV. (2003), para la totalidad de la cuenca del río Salitre se ha estimado que estos vertimientos alcanzan 2,500 toneladas por año y que representan un equivalente poblacional de aproximadamente 163,000 habitantes, lo que corresponde a un 11.3% de la población de la cuenca. Es claro que se hace necesaria una intervención a las estructuras de alivio de la cuenca en su parte combinada.

6.5.2 Estado estructural del alcantarillado de la subcuenca

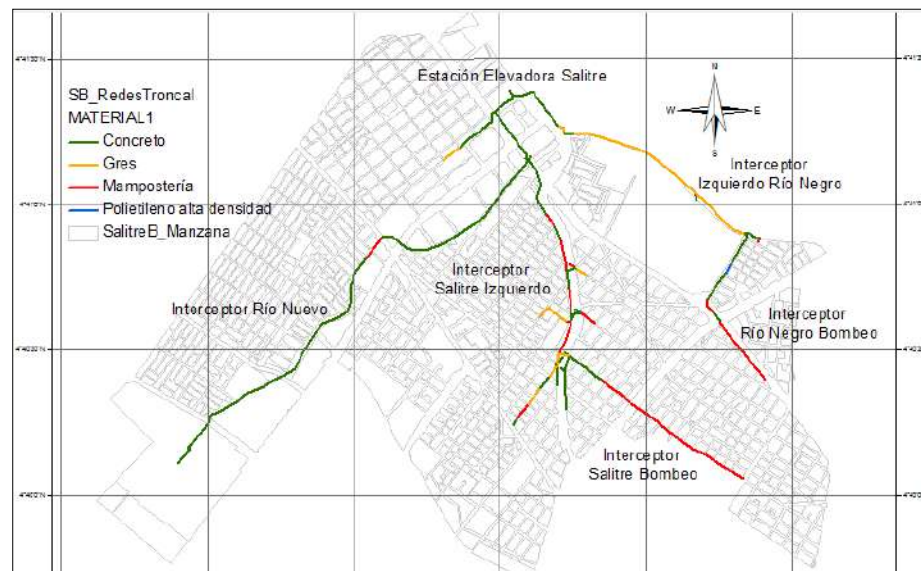
El estado estructural de los elementos del alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” se establece por medio de la evaluación de su vida útil, la cual se estima con respecto al material y la edad de instalación de los elementos. Con base en el análisis de estos parámetros, obtenidos mediante cartografía, documentos e informes técnicos provistos por la EAAB, se clasificaron las redes troncales de la subcuenca “Salitre Bombeo” y se asignó el valor de estado estructural correspondiente a cada elemento en relación con la remanencia de su vida útil estimada.

▪ Material de los elementos del sistema de alcantarillado

El resultado de la consulta en el shape de red troncal de las redes del alcantarillado de la subcuenca, muestra que la subcuenca “Salitre Bombeo” cuenta con conductos construidos en concreto, gres, mampostería y polietileno de alta densidad. La Figura 6-33 muestra la distribución de los conductos de la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” y el material en el que están construidos, y la Figura 6-34 muestra la distribución y el material de los pozos de la subcuenca.

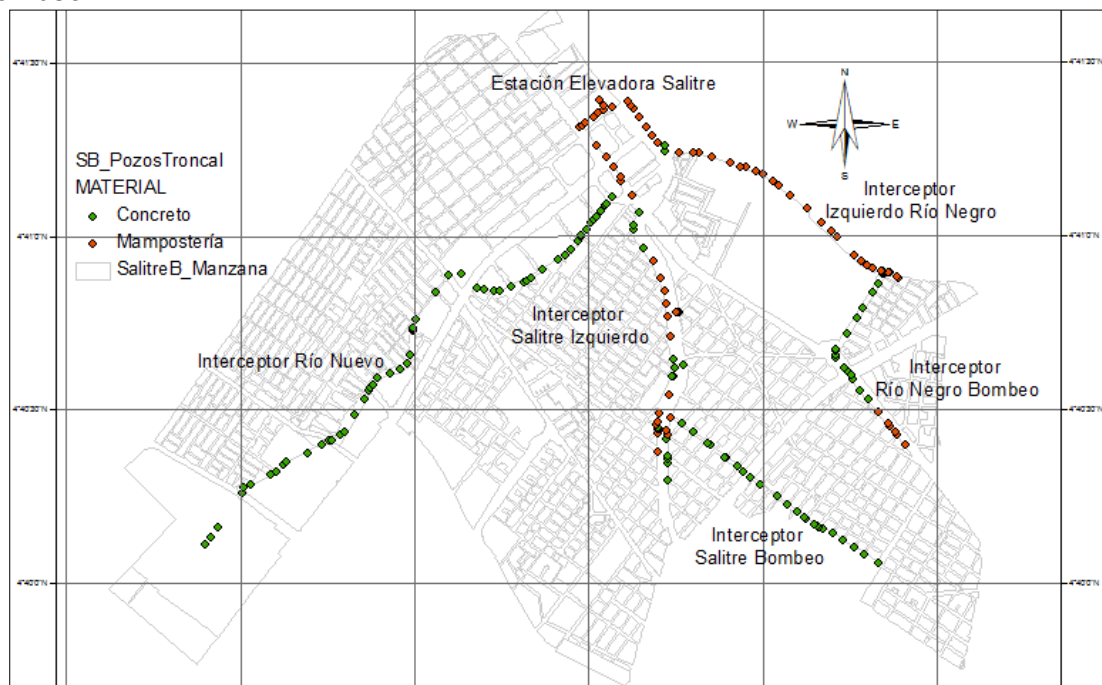
La mayor parte de los conductos del interceptor Río Nuevo corresponden a estructuras de concreto, así como la llegada de los tres interceptores a la Estación Elevadora Salitre. Los conductos del interceptor Salitre Bombeo son principalmente de mampostería, continuando con el interceptor Salitre Izquierdo en donde se presentan conductos de gres, mampostería y hacia la entrega final mayormente de concreto. En el interceptor Río Negro Bombeo la mayor parte de los conductos son de mampostería y en el interceptor Izquierdo Río Negro son primordialmente de gres.

Figura 6-33. Material de los conductos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.



En relación con la Figura 6-34 se observa que los pozos de los interceptores Río Nuevo, “Salitre Bombeo” y Río Negro Bombeo se encuentran mayormente contruidos en concreto en tanto los interceptores Salitre Izquierdo, Río negro Izquierdo y los pozos de los tramos que concentran las redes hacia la Estación Elevadora Salitre fueron contruidos en mampostería.

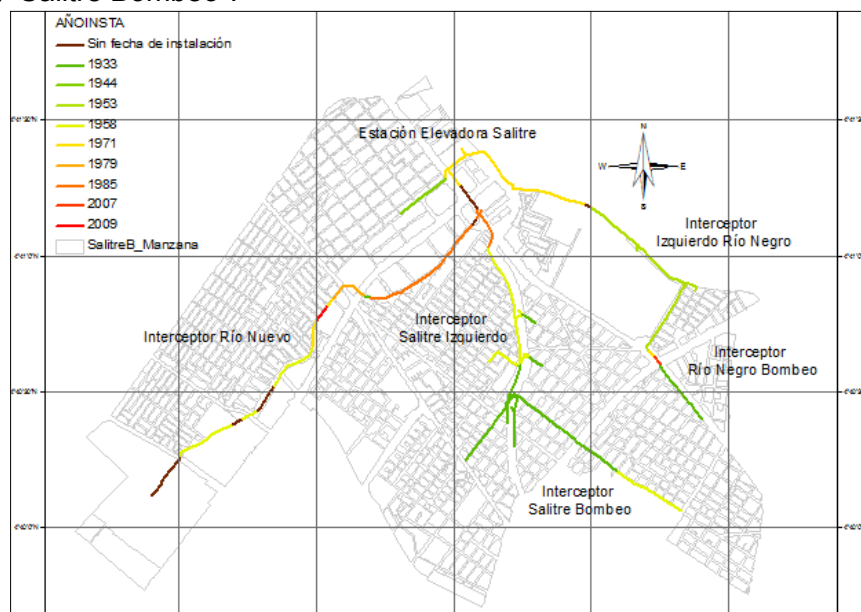
Figura 6-34. Material de los pozos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.



▪ Edad del elemento del sistema de alcantarillado

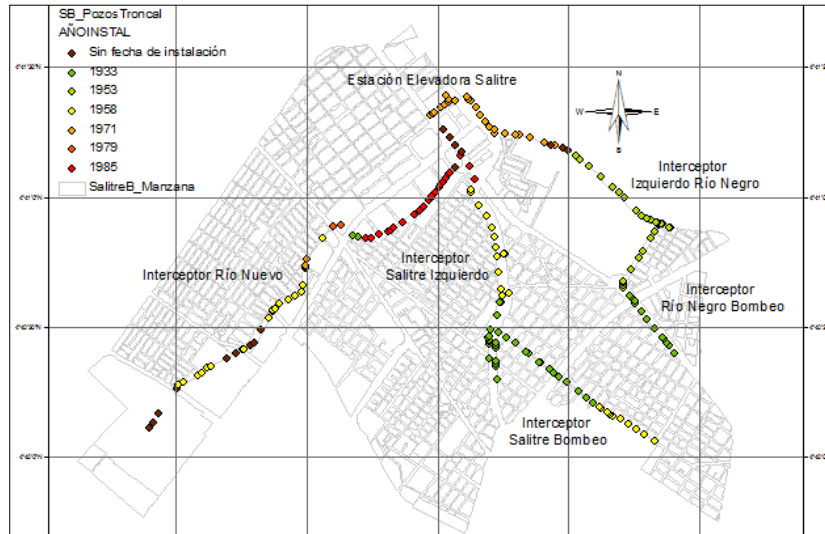
La edad de los elementos del sistema de alcantarillado analizados (i.e. conductos y pozos) se establece con relación a su fecha de instalación, considerando que a partir de ese momento inicia su operación, por consiguiente su vida útil empieza a verse disminuida. En la Figura 6-35 se muestra que el primer grupo de conductos pertenecientes a la red troncal de la subcuenca fueron instalados en 1933, siendo predominantes en el tramo del interceptor Salitre Bombeo. Los tramos instalados entre 1944 y 1953 corresponden especialmente al interceptor Río Negro Bombeo y Río Negro Izquierdo. Por consiguiente, la mayor cantidad de tramos instalados entre 1979 y 1985 corresponde al interceptor de Río Nuevo en su paso por el sector de Metrópolis, lo que hace que este sea el interceptor que contiene los conductos más nuevos de la subcuenca.

Figura 6-35. Fecha de instalación de los conductos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.



En relación con la edad de los pozos del sistema de alcantarillado, la Figura 6-36 muestra que los pozos más antiguos de la subcuenca fueron instalados en el año 1933 en los interceptores de “Salitre Bombeo” y Río Negro Bombeo. Siguiendo con la tendencia de los conductos, los pozos de la subcuenca más recientes corresponden al interceptor Río Nuevo en su paso por el sector de Metrópolis. Es de destacar que algunos tramos y sus pozos no se reportan caracterizados por la EAAB y aparecen sin fecha de instalación, por lo consiguiente en el presente análisis se consideran dentro del grupo más antiguo del sector.

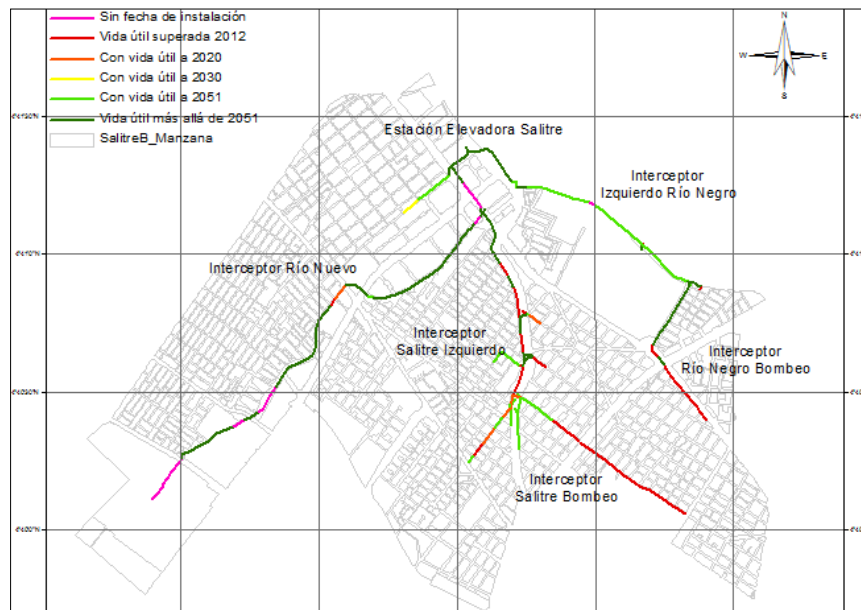
Figura 6-36. Fecha de instalación de los pozos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.



▪ Vida útil remanente de los elementos del sistema de alcantarillado

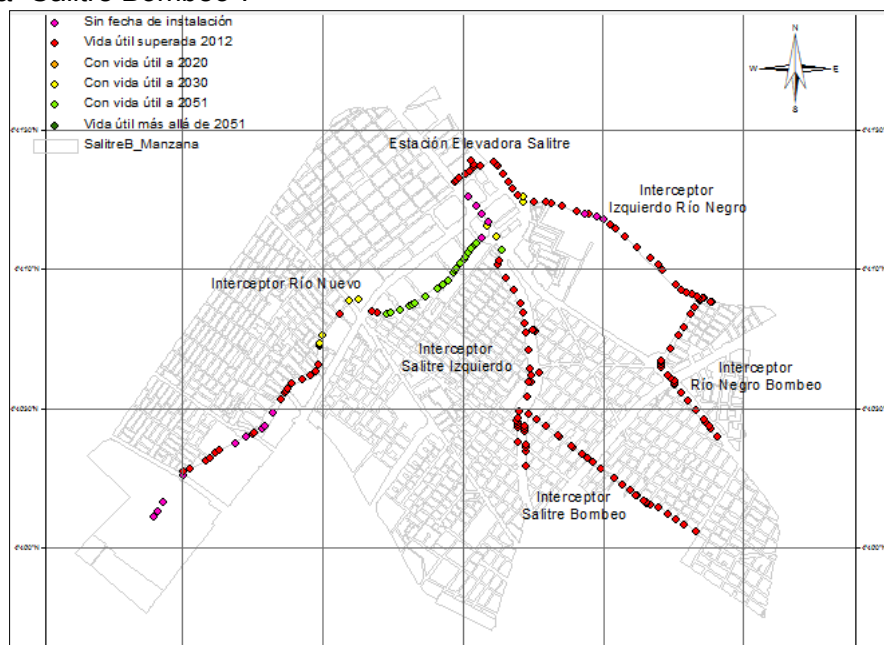
Con el objeto de relacionar los dos índices evaluados previamente, se determina el estado estructural de los elementos de la subcuenca por medio de la vida útil remanente teórica de cada uno de estos, de acuerdo con la ecuación (4-26) y los datos de vida útil teórica de los elementos del sistema de alcantarillado dispuestos en la Tabla 4-11. Como resultado de este análisis para los elementos de la subcuenca “Salitre Bombeo”, en la Figura 6-37 se observa una clasificación que incluye a aquellos conductos que actualmente ya han superado su vida útil en el escenario de análisis actual (i.e. identificados el color rojo para el escenario actual 2012). En esta primera clasificación es importante destacar que algunos tramos de conductos ya han superado su vida útil teórica desde hace 39 años (e.g. conductos en mampostería cuya vida útil teórica de acuerdo con la Tabla 4-11 corresponde a 40 años, cuya instalación se realizó en el año 1933, presentes en el tramo oriental del interceptor Salitre Bombeo). Es de destacar que algunos tramos y sus pozos no se reportan caracterizados por la EAAB y aparecen sin fecha de instalación, por lo consiguiente en el presente análisis se consideran dentro del grupo con vida útil superada y requerirán una especial atención por parte de la EAAB.

Figura 6-37. Vida útil remanente teórica de los conductos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.



En relación con la vida útil remanente teórica de los pozos de la red troncal de alcantarillado de la subcuenca, se establece que una alta cantidad de pozos construidos en mampostería corresponden a aquellos cuya vida útil ha sido superada para el escenario actual (i.e. escenario a 2012), en tanto aquellos que presentan una vida útil remanente teórica mayor corresponde a aquellos construidos en concreto instalado en el sector de Metrópolis pertenecientes al interceptor Río Nuevo.

Figura 6-38. Vida útil remanente teórica de los pozos del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.



6.6 Vulnerabilidad social en la subcuenca “Salitre Bombeo”

En el presente numeral se caracterizan las particularidades socioeconómicas de la población de la subcuenca “Salitre Bombeo”, dando respuesta a los índices e indicadores de la metodología RPIU para el análisis de la vulnerabilidad social en la subcuenca.

6.6.1 Distribución territorial

Dentro del ordenamiento territorial se contemplan las principales características que caracteriza la distribución de espacios, usos, dentro de la subcuenca urbanizada. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial vigente en Bogotá, POT 2000, la Bogotá D.C. está dividida en 20 localidades y para efectos de la reglamentación del POT cada localidad se subdivide en varias Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ). Las UPZ están conformadas por uno o más barrios, los cuales se agrupan de acuerdo con características homogéneas y en éstas se determinan las áreas dedicadas a servicios recreativos, a conservación de sistemas ecológicos o especificaciones como el tipo o número de pisos que se pueden levantar por edificación. La Tabla 6-12 presenta la distribución territorial de la subcuenca de drenaje de tipo combinada “Salitre Bombeo”.

Tabla 6-12. Distribución territorial de la subcuenca combinada “Salitre Bombeo”

Ciudad	Cuenca hidrográfica	Subcuenca de drenaje combinado	Localidad	UPZ	Barrios	Manzanas
Bogotá D.C.	Río Salitre	Salitre Bombeo	Barrios Unidos	Los Andes	Enterrios	53
					Escuela Militar	
					La Patria	
				Doce de Octubre	Jorge Eliecer Gaitán	436
					La Libertad	
					Simón Bolívar	
					Metrópolis	
					San Fernando	
					San Fernando Occidental	
					Doce de Octubre	
					San Miguel	
					Popular Modelo	
					José Joaquín Vargas	
			Los Alcazares		Polo Club	162
					Juan XXIII	
					Santa Sofía	
					San Felipe	
					La Aurora	
			Engativá	Las Ferias	Once de Noviembre	323
					Julio Flores	
					Las Galias	
					Santa Rosa	
					Metrópolis (Occidental)	
					Las Ferias	
					Las Ferias Occidental	
					Bellavista Occidental	
					La Estrada	
					La Estradita	
					Urbanización El Gualí	
					Bosque Popular	
			Jardín Botánico	Jardín Botánico		3

6.6.2 Índice demográfico

La demografía de la subcuenca “Salitre Bombeo” es representada en la metodología RPIU por medio de los indicadores de Densidad Poblacional, el Índice de Dependencia Demográfica, densidad de LEA y densidad de E & S.

Los datos para la construcción de estos indicadores a nivel de manzana provienen del Censo Básico 2005 (DANE, 2005) y la proyección de población a nivel de UPZ proviene de las Proyecciones de Vivienda, Hogares y Población - Bogotá, consultados mediante la SDP (2010).

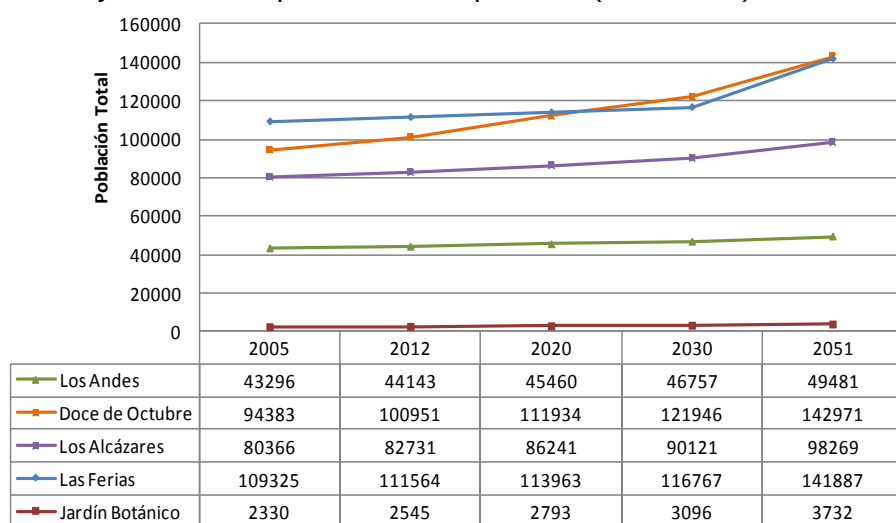
En relación con el área total de la cuenca “Salitre Bombeo”, la población total se distribuye en un 14% de la UPZ Los Andes, 28% de la UPZ Doce de Octubre, 24% de la UPZ Los Alcázares, 33% de la UPZ Las Ferias y 1% de la UPZ Jardín Botánico.

▪ Proyecciones de población

Los datos poblacionales de la subcuenca “Salitre Bombeo” en la aplicación de la metodología RPIU se establecen a nivel de manzana. No obstante, para establecer las proyecciones de población, la dinámica poblacional se analiza a nivel de UPZ y estas se aplican para determinar la población proyectada en el escenario actual (año 2012) y los escenarios de condiciones futuras 2020, 2030 y 2051, para cada manzana de la subcuenca.

En relación con el censo de 2005, la Figura 6-39 presenta las proyecciones para cada uno de los escenarios propuestos. De acuerdo con EAAB & ECI (2010), la proyección de población de saturación de la ciudad de Bogotá D.C. se dará en el 2051, año para el cual se ha planteado el último escenario de aplicación de la metodología RPIU.

Figura 6-39. Proyecciones de población total por UPZ (2005-2051)



Las proyecciones de población total de la subcuenca “Salitre Bombeo” relevan una tendencia al crecimiento, especialmente en las UPZ Doce de Octubre y Las Ferias.

Para exponer el comportamiento de cada grupo etario en los escenarios planteados se presenta la Tabla 6-13. En ésta se observa que la población de los grupos etarios de adultos y adultos mayores presenta crecimiento en todas las UPZ hasta el año 2051, especialmente este último grupo. Sin embargo, el grupo etario correspondiente a los niños y jóvenes presenta un comportamiento decreciente, lo que se traduce en que un alto porcentaje de la subcuenca presentará adultos mayores en su población en escenarios futuros.

De acuerdo con la Tabla 6-13, para el año 2051 la UPZ Los Andes presenta un 77% menos niños y jóvenes en relación con lo reportado en 2005, lo cual es la mayor diferencia con respecto a este grupo etario. La UPZ más poblada en 2005 corresponde a Las Ferias, no obstante para el año 2051 es superada por la población de la UPZ Doce de Octubre.

Tabla 6-13. Proyecciones de población por grupos etarios (2005-2051)

UPZ	Grupos Etarios	2005	2012	2020	2030	2051	Dif 2005-2051
Los Andes	0-19	11788	10396	8825	6840	2672	-77%
	19-59	27072	27816	28892	29977	32256	16%
	60-80+	4436	5931	7743	9940	14554	70%
	Total	43296	44143	45460	46757	49481	12%
Doce de Octubre	0-19	28141	26446	27013	24548	19372	-31%
	19-59	55142	58883	63740	69217	80719	32%
	60-80+	11100	15622	21181	28181	42881	74%
	Total	94383	100951	111934	121946	142971	34%
Los Alcázares	0-19	21991	19984	17690	14723	8492	-61%
	19-59	46890	49118	52116	55504	62619	25%
	60-80+	11485	13629	16435	19894	27158	58%
	Total	80366	82731	86241	90121	98269	18%
Las Ferias	0-19	34104	31071	27447	22868	32484	-5%
	19-59	62904	66125	69436	73389	81690	23%
	60-80+	12317	14368	17080	20510	27713	56%
	Total	109325	111564	113963	116767	141887	23%
Jardín Botánico	0-19	751	635	524	394	121	-84%
	19-59	1400	1715	2047	2448	3290	57%
	60-80+	179	195	222	254	321	44%
	Total	2330	2545	2793	3096	3732	38%

▪ Densidad Poblacional

En relación con la densidad poblacional en las UPZ de la subcuenca “Salitre Bombeo”, se establece que el área de las manzanas no cambiará, en tanto la población se comportará de acuerdo con el comportamiento anteriormente descrito. La cantidad de personas por hectárea en las UPZ de análisis se presenta en la Tabla 6-14, en donde la UPZ Doce de

Octubre registra la mayor densidad y la UPZ Jardín Botánico la menor densidad poblacional.

Tabla 6-14. Densidad Poblacional Total en las UPZ de la subcuenca “Salitre Bombeo” (Personas/Ha).

UPZ/ Año	2005	2012	2020	2030	2051
Los Andes	157	161	165	170	180
Doce de Octubre	282	301	334	364	426
Los Alcázares	194	200	208	218	237
Las Ferias	231	235	240	246	299
Jardín Botánico	14	16	17	19	23

▪ Índice de Dependencia Demográfica

En relación con el índice de dependencia poblacional se clasificaron los grupos etarios de la población y aquellas personas que tienen condiciones de dependencia especial sin ser relevante su edad, en relación con un adulto en edad laboral. Para el caso de las UPZ de la subcuenca “Salitre Bombeo” se presenta la Tabla 6-15, en la cual se registra que la dependencia poblacional en promedio oscila entre 0.53 y 0.71, es decir que en promedio una persona en edad laboral es responsable de al menos una persona en edad infantil, adulto mayor o persona con necesidades especiales a nivel de la subcuenca “Salitre Bombeo”. Este indicador se considera de igual valor para las manzanas contenidas en una misma UPZ de la subcuenca.

Tabla 6-15. Índice de dependencia demográfica para la subcuenca “Salitre Bombeo” (Adimensional)

UPZ	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	PROMEDIO
LOS ANDES	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68
DOCE DE OCTUBRE	0.71	0.70	0.70	0.70	0.70	0.71	0.71	0.71	0.72	0.72	0.72	0.71
LOS ALCAZARES	0.71	0.71	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69
LAS FERIAS	0.74	0.72	0.72	0.71	0.70	0.70	0.69	0.69	0.68	0.68	0.68	0.70
JARDIN BOTANICO	0.66	0.61	0.58	0.55	0.53	0.51	0.50	0.48	0.48	0.47	0.46	0.53

▪ Densidad de LEA

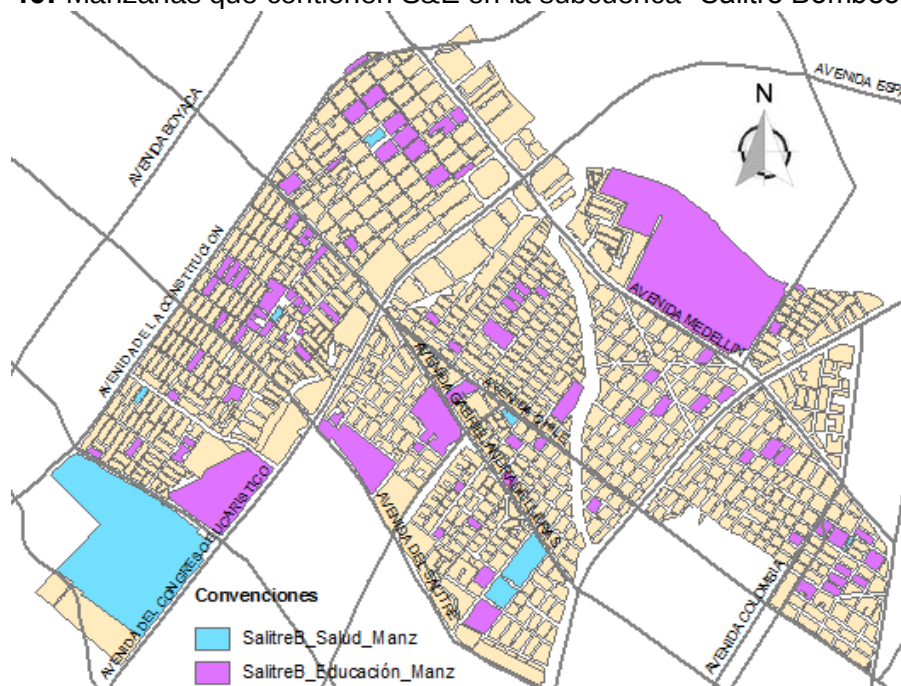
La densidad de Lugares Especiales de Alojamiento (LEA) en la subcuenca “Salitre Bombeo” establece la atención especial que requerirán ciertas personas ante una situación de emergencia. La Tabla 6-16 muestra la densidad de establecimientos LEA en las UPZ de la subcuenca “Salitre Bombeo”, en donde se destaca una alta densidad de asilos de ancianos en las UPZ Los Alcázares y Los Andes, con 9 y 15 establecimientos respectivamente. Este indicador se considera a nivel de UPZ.

Tabla 6-16. Densidad de establecimientos LEA en las UPZ de la subcuenca “Salitre Bombeo”.

TIPO DE LEA	LOS ANDES	DOCE DE OCTUBRE	LOS ALCAZARES	LAS FERIAS	JARDIN BOTANICO
Cárcel	0.0036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Albergue infantil	0.0073	0.0030	0.0193	0.0042	0.0062
Asilo de ancianos	0.0327	0.0149	0.0362	0.0105	0.0062
Convento, seminario	0.0109	0.0089	0.0193	0.0127	0.0062
Internado de estudio	0.0000	0.0000	0.0024	0.0000	0.0062
Cuartel, guarnición	0.0036	0.0000	0.0024	0.0000	0.0124
Campamento de trabajo	0.0109	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Lugar para alojar habitantes de la calle	0.0000	0.0000	0.0024	0.0021	0.0000
Casas de lenocinio, prostíbulos	0.0000	0.0000	0.0121	0.0000	0.0000
Albergue de desplazados	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Albergue de reinsertados	0.0000	0.0000	0.0048	0.0042	0.0000
Centro de rehabilitación no penitenciario	0.0036	0.0060	0.0097	0.0000	0.0062
Otro	0.0073	0.0119	0.0145	0.0105	0.0000
TOTAL	0.0800	0.0447	0.1231	0.0443	0.0433

▪ Densidad de E&S

La densidad de establecimientos educativos y de salud en la subcuenca “Salitre Bombeo”, establece la atención especial que requerirán ciertas manzanas de la subcuenca ante una situación de emergencia. La Figura 6-40 presenta las manzanas que contienen establecimientos educativos y aquellas con prestación de salud en las UPZ de la subcuenca “Salitre Bombeo”, en donde se destaca una alta cantidad de colegios. Las manzanas que contienen este tipo de establecimientos se destacan con una vulnerabilidad de 5 en una escala de 0 a 10, estableciendo que tienen una prelación 50% mayor que cualquier otra edificación.

Figura 6-40: Manzanas que contienen S&E en la subcuenca “Salitre Bombeo”.

6.6.3 Condiciones de vida de la población

En la subcuenca “Salitre Bombeo” la evaluación por medio de la cual se establece las condiciones de vida de la población es relacionando el Índice de Calidad de Vida (ICV), el índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI), el Índice de Gini y el estrato socioeconómico de la unidad de análisis, como lo establece la metodología RPIU. Debido a que el cálculo de los índices ICV y NBI requieren de una alta cantidad de información de indicadores simples, el DANE se ha encargado de establecer esta información de forma especial y ha realizado las Encuestas de Calidad de Vida a diferentes niveles para todo el país (i.e. nivel nacional y ciudades capitales principalmente). Para el caso de Bogotá D.C. los resultados de esta encuesta se consideran como los datos oficiales para cada una de las localidades y el año más reciente de consecución de la información es el 2007.

▪ Índice ICV DANE

En el caso del ICV la mejor escala de consecución fue a nivel de localidad, la cual es referida al área contenida en la subcuenca “Salitre Bombeo” y la información proviene de la Encuesta de Calidad de Vida, DANE (2007), Tabla 6-17.

Tabla 6-17. Índice de Calidad de Vida por localidades en “Salitre Bombeo”, DANE (2007).

LOCALIDADES	Hogares	Hogares con vivienda inadecuada		Hogares con servicios inadecuados		Hogares con hacinamiento o crítico		Hogares con inasistencia escolar		Hogares con alta dependencia económica		Hogares pobres por NBI (Una o más NBI)		Hogares en miseria por NBI (Dos o más NBI)	
	TOTAL	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%
Engativá	241,964	293	0.1	0	0.0	3,573	1.5	1,184	0.5	1,736	0.7	6,617	2.7	170	0.1
Barrios Unidos	68,494	309	0.5	0	0.0	1,347	2.0	298	0.4	470	0.7	2,424	3.5	0	0.0
Total Bogotá	1,978,528	13,832	0.7	4,635	0.2	52,154	2.6	8,934	0.5	30,824	1.6	98,276	5.0	10,679	0.5

Se observa que el ICV para las localidades de Barrios Unidos y Engativá supera el promedio hallado para Bogotá D.C., lo que revela buenas condiciones de calidad de vida para la subcuenca “Salitre Bombeo”.

▪ Personas con Necesidades Básicas Insatisfechas NBI

Para las localidades que se encuentran dentro del territorio de la cuenca de “Salitre Bombeo” se presentan los siguientes valores del índice de NBI para hogares de acuerdo con la Encuesta de Calidad de Vida DANE (2007), Tabla 6-18 .

Tabla 6-18. Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas hogares, DANE (2007).

LOCALIDADES	Hogares	Hogares con vivienda inadecuada		Hogares con servicios inadecuados		Hogares con hacinamiento crítico		Hogares con inasistencia escolar		Hogares con alta dependencia económica		Hogares pobres por NBI (Una o más NBI)		Hogares en miseria por NBI (Dos o más NBI)	
	TOTAL	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%
Engativá	241,964	293	0.1	0	0.0	3,573	1.5	1,184	0.5	1,736	0.7	6,617	2.7	170	0.1
Barrios Unidos	68,494	309	0.5	0	0.0	1,347	2.0	298	0.4	470	0.7	2,424	3.5	0	0.0
Total Bogotá	1,978,528	13,832	0.7	4,635	0.2	52,154	2.6	8,934	0.5	30,824	1.6	98,276	5.0	10,679	0.5

Asimismo, fue posible la consecución del índice de NBI para personas en las localidades contenidas en la subcuenca “Salitre Bombeo”, reportadas en la Encuesta de Calidad de Vida DANE (2007), Tabla 6-19.

Tabla 6-19. Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas personas, DANE (2007).

LOCALIDADES	Personas	Personas en viviendas inadecuada		Personas en viviendas con servicios inadecuados		Personas en hogares con hacinamiento crítico		Personas en hogares con inasistencia escolar		Personas en hogares con alta dependencia económica		Personas pobres por NBI (Una o más NBI)		Personas en miseria por NBI (Dos o más NBI)	
	TOTAL	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%	TOTAL	%
Engativá	824,337	824	0.1	0	0.0	16,657	2.0	6,149	0.7	9,463	1.1	31,902	3.9	1190	0.1
Barrios Unidos	230,066	573	0.2	0	0.0	7,537	3.3	1186	0.5	2247	1.0	11,543	5.0	0	0.0
Total Bogotá	7,035,155	57,603	0.8	15,814	0.2	280,191	4.0	46,848	0.7	164,359	2.3	493,929	7.0	62,739	0.9

Para el análisis de la condición actual de la subcuenca “Salitre Bombeo” se selecciona el indicador de personas pobres por NBI que representa la carencia de al menos una de las necesidades representadas por los indicadores simples analizados, debido a que el porcentaje es mayor que al de hogares y puede deberse a la presencia de habitantes de vivienda unipersonal y de personas sin hogar.

▪ Grado de concentración del ingreso – Coeficiente de Gini

En relación con el coeficiente de Gini, este se emplea para establecer la desigualdad del ingreso en la subcuenca “Salitre Bombeo”. Para este indicador la mejor resolución geográfica de consecución fue a nivel de localidad, proveniente de la Encuesta de Calidad de Vida DANE (2007).

Tabla 6-20. Coeficiente de Gini, DANE (2007).

LOCALIDAD	2007										GINI
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Engativá	0.98	2.65	3.54	4.81	5.99	7.61	9.76	12.67	17.39	34.62	0.4680
Barrios Unidos	0.78	1.94	2.67	3.49	4.80	6.35	8.72	11.89	18.15	41.20	0.5406
Total Bogotá	0.77	2.12	3.08	4.17	5.40	7.06	9.17	12.06	17.35	38.83	0.5106

Estos valores del coeficiente de GINI expresan, de acuerdo con lo contenido en la Tabla 4-4, que en las dos localidades y en promedio para Bogotá existen claras situaciones de desigualdad en el ingreso, siendo ligeramente mayor en la localidad de Barrios Unidos.

Es de destacar que los tres indicadores de calidad de vida tratados anteriormente revelan en promedio las condiciones de las localidades de Engativá y Barrios Unidos, localidades en las que se encuentra contenida la subcuenca “Salitre Bombeo”. Sin embargo, el nivel de consecución de la información (i.e. localidad) no permite hacer una distinción de las condiciones dentro de las localidades, por lo cual será de interés establecer por medio de la estratificación a nivel de manzana, una distinción mayor de las condiciones de vida en la subcuenca “Salitre Bombeo”.

▪ Estrato socioeconómico

La subcuenca “Salitre Bombeo” presenta manzanas predominantemente de estrato 0 (i.e. áreas sin estrato), 3, 4, por lo cual se puede considerar como un territorio de mediana resiliencia económica. La Figura 6-41 muestra la cantidad de manzanas dentro de las UPZ en las que se encuentra contenida la subcuenca “Salitre Bombeo” y la Figura 6-42 presenta la distribución del territorio en función de la estratificación socioeconómica relacionada con las viviendas.

Figura 6-41. Número de manzanas en las UPZ en las que se encuentra contenida la subcuenca “Salitre Bombeo” en relación con la estratificación. DANE (2005).

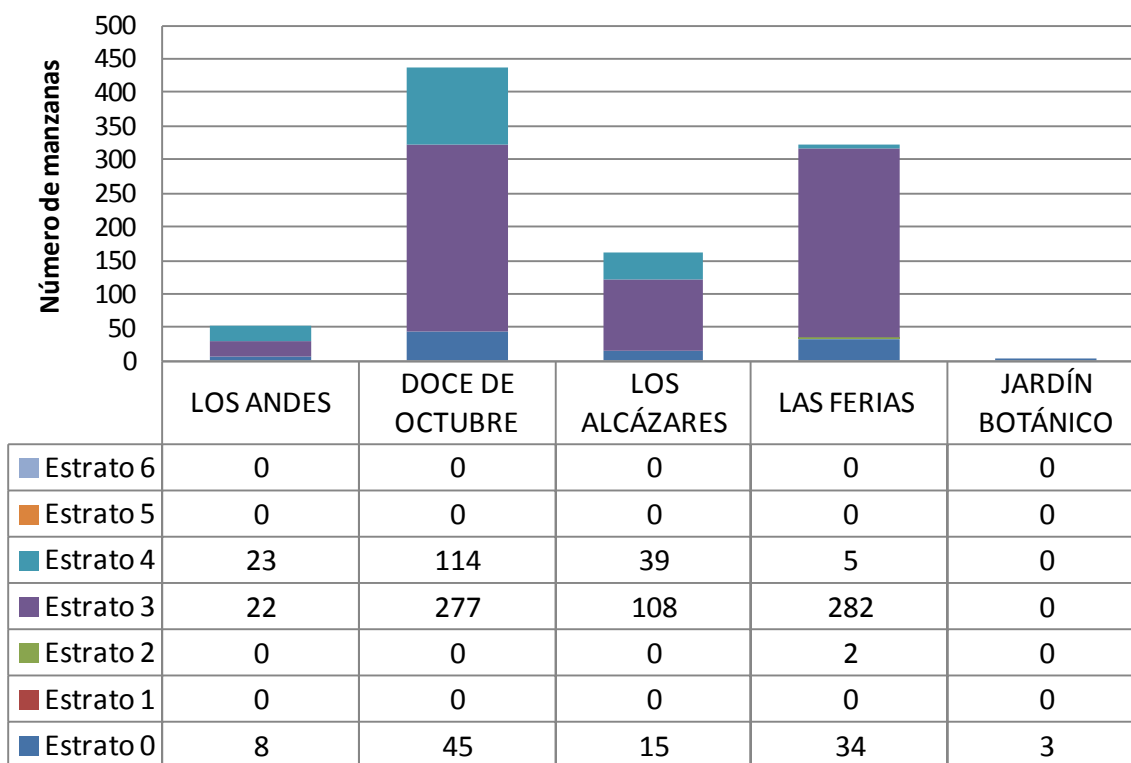
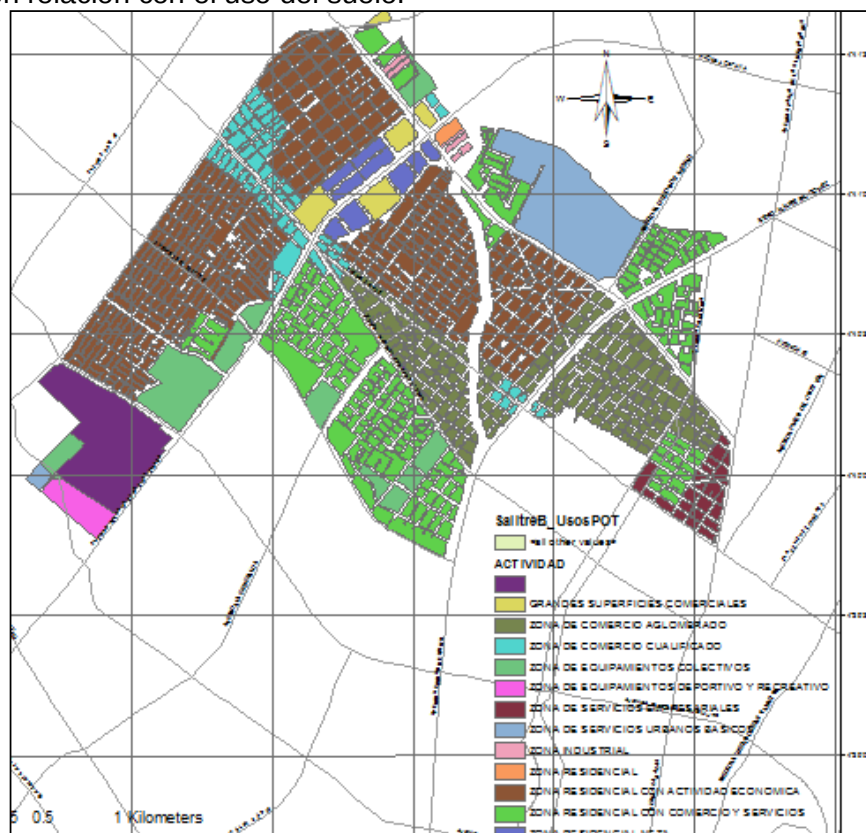


Figura 6-43. Actividad humana predominante en las manzanas en la subcuenca “Salitre Bombeo” en relación con el uso del suelo.



▪ Exposición humana al aumento del nivel del agua

De acuerdo con la metodología RPIU este indicador es dependiente de la delimitación de las áreas amenazadas por encharcamiento o inundación, en relación con los periodos de retorno empleados en la modelación hidrodinámica de la subcuenca. En este aspecto, la afectación de las personas incrementará en tanto aumente su exposición a la amenaza, situación que se presenta en aquellas manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” que se encuentran dentro de las áreas más bajas y aquellas cercanas a los tramos de alcantarillado que presentan insuficiencia hidráulica. De acuerdo con la Tabla 4-5, se clasificaron los rangos de profundidad de la lámina de agua o calado presentes en la subcuenca “Salitre Bombeo” y posteriormente se asignó a cada manzana el valor de afectación que pueden llegar a tener las personas que se encuentren expuestas a la amenaza en esa área.

En la Figura 6-44 se observa que en la mayor parte de la subcuenca “Salitre Bombeo” se pueden esperar profundidades de menores de 0.1 m (i.e. color cian) por lo cual la lámina se desplaza por las calles y no reviste afectación para las personas. Le siguen en cantidad aquellas manzanas que se ven afectadas por láminas de agua entre 0.1 y 0.5 m (i.e. color azul) en las cuales se debe tener precaución con los niños y adultos mayores. En las manzanas en donde se reportan alturas entre 0.5 y 0.1 m los niños y adultos

Figura 6-44. Exposición humana en relación con el nivel del agua de la inundación en las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo”



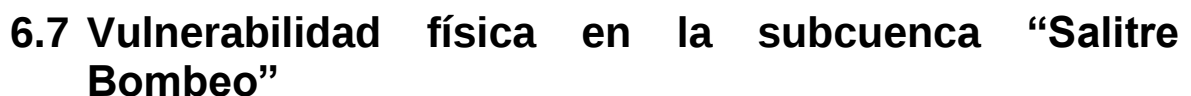
En relación con la duración de la inundación en la subcuenca “Salitre Bombeo” se emplea el mapa de duración de los calados reportado por Iber y se relaciona con las ecuaciones (4-22) a (4-25) del numeral 4.4.3. Se estima que la duración de los encharcamientos en la subcuenca pueden ir desde menos de los diez minutos, momento en el cual empieza a trabajar el sistema de alcantarillado combinado por entrada de las aguas lluvias y empieza el efecto de primer lavado en la subcuenca, hasta manzanas en donde se espera una máxima de la inundación de 180 minutos, siendo esta la duración

Las áreas más afectadas por la duración de la inundación corresponden por lo general a las manzanas afectadas con alturas de inundación mayores. Por consiguiente, las personas que habitan en estas áreas generalmente deberán enfrentar condiciones de humedad frecuente en sus viviendas ante la prolongada exposición de sus bienes y su salud a las aguas de inundación las cuales son de tipo combinadas.

Figura 6-45. Exposición humana en relación con la duración de la inundación en las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo”



Figura 6-46. Exposición humana en relación con la velocidad de la inundación en las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo”



En el análisis de la vulnerabilidad física de la subcuenca “Salitre Bombeo” es de interés conocer las características del territorio que le confieren la capacidad para enfrentar la amenaza por inundación, de acuerdo con lo planteado en el numeral 4.5 para la metodología RPIU.

6.7.1 Índice asociado al territorio

“Salitre Bombeo” se constituye como una subcuenca totalmente urbanizada, por lo cual desde el punto de vista del territorio será de interés conocer su configuración actual y establecer aquellas áreas que son más propensas a sufrir encharcamientos debido a su relieve. En la presente aplicación se contó con información topográfica proveniente del POT 2000 que consiste en curvas de nivel del terreno para Bogotá con una precisión de 5 metros entre curvas. Con el objeto de establecer una mayor precisión se consultó el modelo digital de elevación corregido en la Universidad Nacional de Colombia, el cual tiene 5 metros de precisión. Por medio de esta información fue posible estimar el rango de elevación dentro del cual se encuentra contenida la subcuenca “Salitre Bombeo” (i.e. 2555 a 2550 en el área plana y 2545 en los canales msnm) verificándose que a nivel regional la subcuenca “Salitre Bombeo” es un área predominantemente plana con tendencia de flujo oriente – occidente influenciada por los cerros orientales. No obstante, esta información no provee suficiente claridad sobre la tendencia del drenaje dentro de la subcuenca por lo cual fue necesario realizar una consecución de información más exhaustiva que permita establecer las áreas de factible encharcamiento. En primer lugar se consultó con la EAAB y la SDP acerca de información catastral de elevación en el área de estudio, no obstante en las oficinas consultadas de la primera entidad no se encontró dicha información y en la segunda no está disponible para su uso académico.

En vista de los acontecimientos y con el objeto de generar un modelo de elevación digital a partir de información lo más realista y accesible posible desde el ámbito académico, se empleo el programa Google Earth para la consecución de los datos de elevación en la subcuenca. Se utilizó este software considerando como limitación que la información puntual de los datos de elevación no puede ser tomada como cierta, debido a que la información proviene de imágenes satelitales del terreno y sus coberturas (i.e. vegetación, urbanización, etc.) y su precisión depende de la calidad de las imágenes empleadas.

Por consiguiente, es importante recalcar que el fin último de este ejercicio es realizar la aplicación de la metodología de análisis de riesgo RPIU y que la intención de la implementación de la información topográfica en esta aplicación es proveer una idea de las áreas más propensas a presentar encharcamientos dentro de la subcuenca “Salitre Bombeo”. Para futuras aplicaciones de la metodología se recomienda emplear información de mayor veracidad que permita disminuir la incertidumbre en relación con los datos de elevación del terreno del área a estudiar, recordando que la calidad y cantidad de la información de entrada en el análisis es determinante en la certidumbre y precisión de los resultados.

Para la generación del MDE a partir de información proveniente de Google Earth se siguió el siguiente procedimiento:

- En el software Google Earth se subdividió la subcuenca y se importaron con AutoCAD Civil 3D cada una de estas superficies. Es necesario contar con dichos

programas abiertos simultáneamente, debido a que AutoCAD Civil 3D importa de Google Earth aquello que se esté visualizando en pantalla en el momento. En Google Earth se empleó en la importación de las superficies una altura de ojo de 3.14 km e imágenes del 12 de diciembre de 2009. La ruta de importación de las superficies e imágenes en AutoCAD Civil 3D 2011 es en la barra de herramientas, pestaña “Insert”, “Import”, “Google Earth”, “Google Earth Image and Surface”.

- Una vez importadas las superficies e imágenes del área de estudio en AutoCAD Civil 3D 2011 (i.e. para esta aplicación fueron importadas más de 50 superficies) estas deben editadas dejando en archivos DXF separados las superficies, el contorno del área de estudio y las imágenes. El archivo que contiene las superficies debe ser editado uniendo los contornos, de forma que las curvas de nivel del mismo valor sean unidas en una misma curva.
- Con ArcMap (i.e. componente de ArcGIS) se abre el archivo de polilíneas del DXF de superficies. Este archivo deberá depurarse desde de la tabla de atributos, eliminando aquellas curvas de nivel que fueron creadas erróneamente y que no se encuentran en el rango esperado de elevaciones del área de estudio.
- A partir del archivo de polilíneas corregido se crea un shape que contendrá las curvas de nivel editadas. Para crear el shape se selecciona el archivo en la barra de capas de ArcMap (i.e. regularmente llamadas layers), se da clic derecho, “Data”, “Export Data”.
- Esta nueva capa de elevaciones deberá ser georeferenciada (i.e. en este ejercicio se empleó el sistema de coordenadas proyectado Bogota_Ciudad_Bogota, la proyección Transverse_Mercator y el sistema geográfico coordinado GCS_Bogota).
- Utilizando la herramienta “3D Analyst” se crea una red de triángulos irregulares de la superficie (i.e. archivo TIN).
- Se crea el raster de la superficie mediante la herramienta “3D Analyst”, “Convert TIN to raster”.
- Debido a que el raster generado puede haber extrapolado información, se procede a cortar el raster con respecto a la frontera archivada en el DXF del inicio del procedimiento.
- Finalmente la información del raster se convirtió en formato ASCII para la su implementación en el modelo hidrodinámico *Iber*. Éste se obtiene empleando la herramienta “Conversion tools”, “From raster to ASCII”.

En la Figura 6-47 se observa una imagen del modelo de elevación digital corregido de 5m de altura para Bogotá D.C., en donde se observa que es poco lo que se puede diferenciar dentro de un área predominantemente plana como la de la subcuenca “Salitre Bombeo”. En la Figura 6-48 se observa una imagen del modelo de elevación digital generado a partir del procedimiento previamente descrito para la subcuenca “Salitre Bombeo”.

Figura 6-47. Modelo de elevación digital corregido de 5m para la ciudad de Bogotá en el sector de la subcuenca “Salitre Bombeo”.



Figura 6-48. Modelo de elevación digital generado de 0.1m entre valores de elevación para la subcuenca “Salitre Bombeo”.



6.7.2 Índice asociado al uso del suelo

En relación con el porcentaje de impermeabilización del suelo en la subcuenca “Salitre Bombeo”, se destaca que aproximadamente un 94% de las manzanas de la subcuenca corresponde a áreas impermeables (i.e. únicamente 68 de las 1071 manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” se consideran predominantemente permeables). Las áreas verdes de la subcuenca se reducen a las manzanas correspondientes a parques barriales, con especial presencia en el sector sur occidental de la subcuenca en donde se encuentra la Unidad Deportiva El Salitre y el Jardín Botánico José Celestino Mutis. La Figura 6-49 muestra la distribución de áreas impermeables (i.e. color gris, valor 0) y las manzanas predominantemente permeables (i.e. color verde, valor 1).

Figura 6-49. Manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” en relación con su porcentaje de impermeabilización.



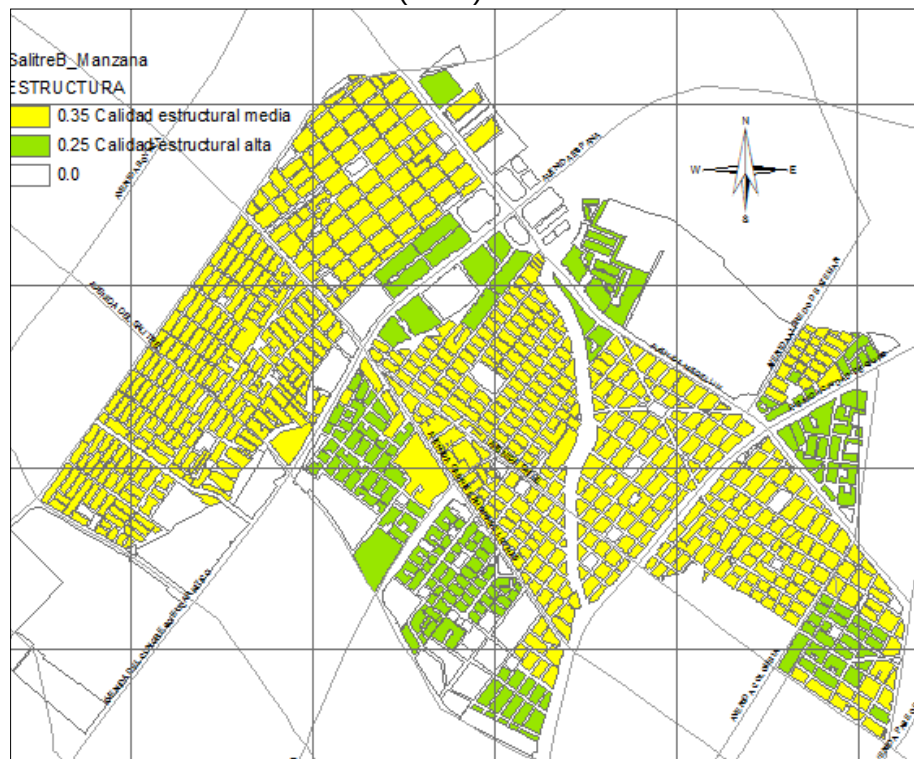
6.7.3 Índice asociado a la exposición de las edificaciones

La vulnerabilidad física de las edificaciones con relación a la exposición a la inundación se estima a partir de tres indicadores a saber: la calidad estructural de las edificaciones, la exposición de las edificaciones al aumento del nivel del agua y la exposición de las edificaciones a la velocidad del agua. A continuación se evalúan estos aspectos para las edificaciones de la subcuenca “Salitre Bombeo”.

▪ Calidad estructural de las edificaciones

La calidad estructural de las edificaciones en la subcuenca “Salitre Bombeo” se estima a partir de la estratificación socioeconómica de la manzana, correlacionándola con la calidad de sus métodos constructivos como se expuso en el numeral 4.5.3. A pesar que el estrato socioeconómico evalúa la integridad estructural de las edificaciones tipo viviendas, éste se considera un buen estimativo de las edificaciones en general en la subcuenca “Salitre Bombeo”, en donde únicamente 4 manzanas se consideran de actividad industrial. Las manzanas de la subcuenca en donde existen viviendas corresponden a un estrato socioeconómico 2, 3 ó 4, distribuidas como se muestra la Figura 6-50, en donde se ha asignado la siguiente valoración: para el estrato 2 se estima una vulnerabilidad estructural del 50%, para el estrato 3 del 35% y para el estrato 4 del 25%. De acuerdo con DANE (2005), de las viviendas que pertenecen a la localidad de Engativá el 50,3% de los hogares son propietarios de su vivienda y en la localidad de Barrios Unidos esta cifra corresponde al 45,5%.

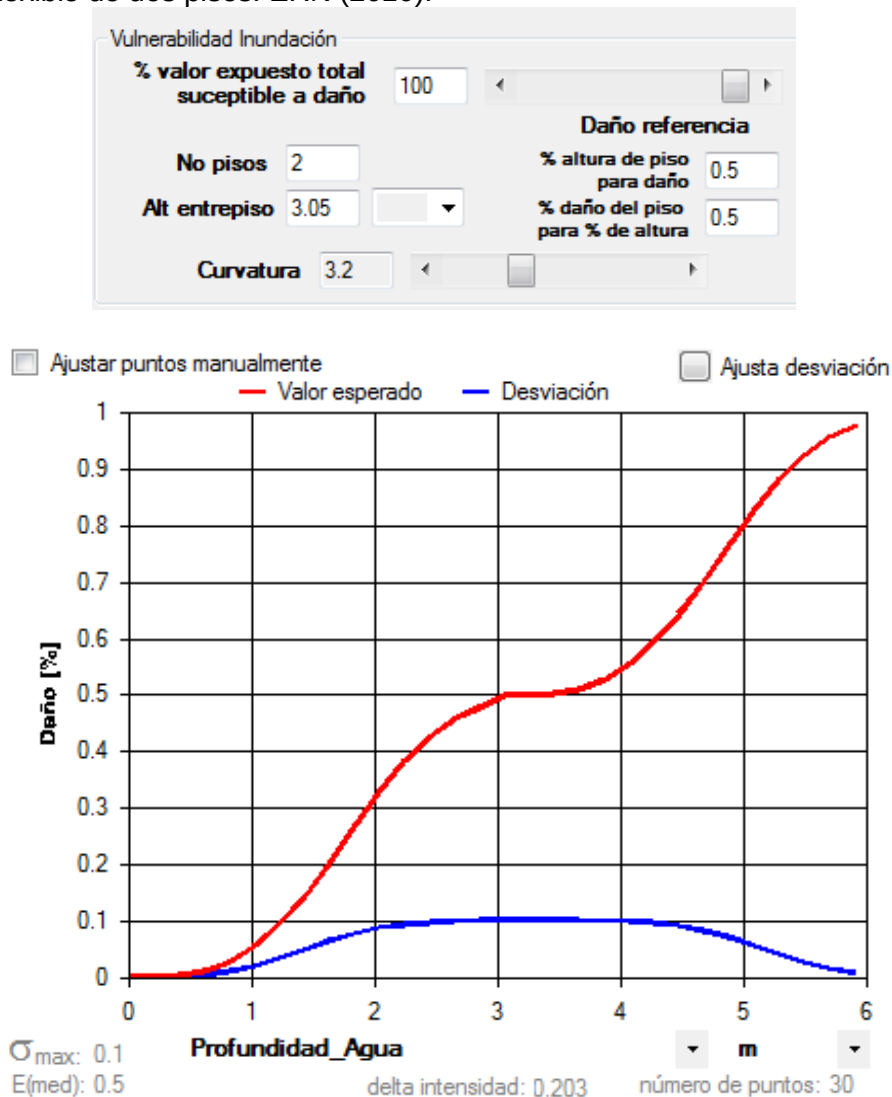
Figura 6-50. Calidad estructural de las edificaciones en función del estrato socioeconómico de la manzana. DANE (2005).



- **Exposición de las edificaciones al aumento del nivel del agua**

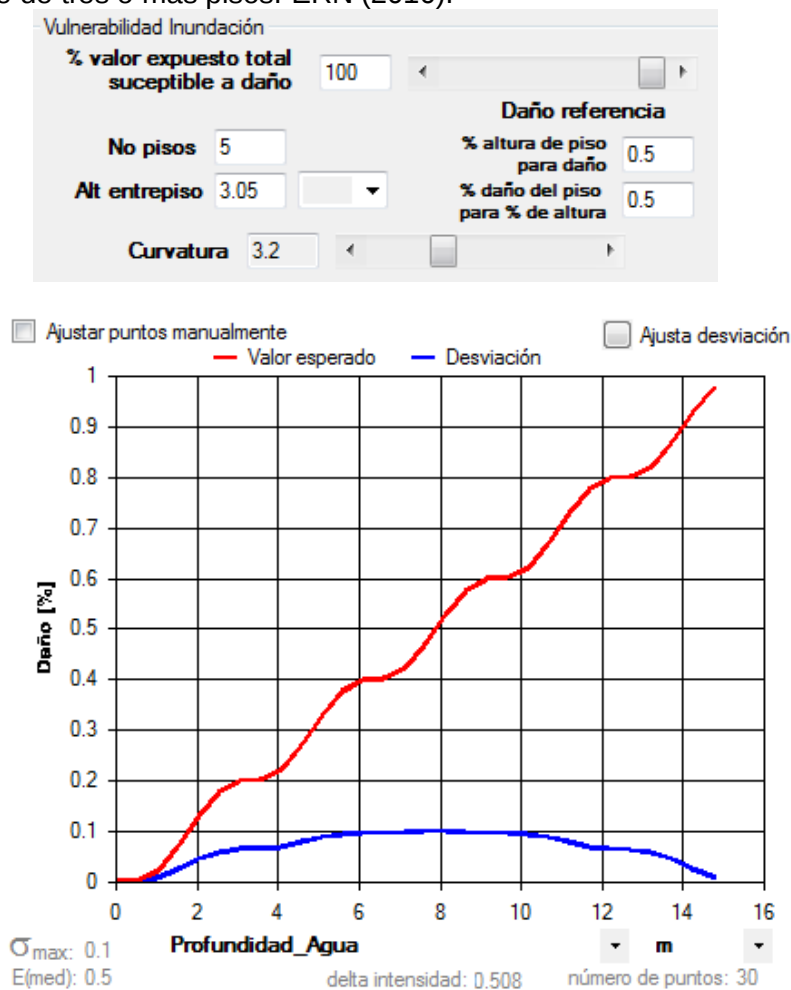
La estimación de los efectos del aumento del nivel del agua en caso de encharcamiento o inundación se realiza a partir de los resultados de nivel del agua proveniente de la modelación hidrodinámica de encharcamiento en la subcuenca “Salitre Bombeo” por medio del modelo *Iber* e implementando las funciones de vulnerabilidad física expuestas por ERN – CAPRA (2000). Se considera que las edificaciones comparten características estructurales en función de su estratificación, asumiendo como promedio que las edificaciones de estrato 3 son de mampostería en diafragma flexible de dos pisos, con altura de entrepiso 3,05m. La Figura 6-51 corresponde a la función de vulnerabilidad física para edificaciones de mampostería en diagrama flexible de dos pisos de acuerdo con ERN (2010).

Figura 6-51. Función de vulnerabilidad física para edificaciones de mampostería en diagrama flexible de dos pisos. ERN (2010).



Asimismo, se asume que las edificaciones de estrato 4 son de mampostería en diafragma flexible de tres pisos o más, con altura de entrepiso 3,05m. La Figura 6-52 corresponde a la función de vulnerabilidad física para edificaciones de mampostería en diagrama flexible de tres o más pisos de acuerdo con ERN (2010).

Figura 6-52. Función de vulnerabilidad física para edificaciones de mampostería en diagrama flexible de tres o más pisos. ERN (2010).



Al implementar los datos de profundidad de la inundación con el estado estructural promedio de cada manzana de la subcuenca “Salitre Bombeo” se obtiene la Figura 6-53, en donde se observa que existe una exposición de las edificaciones por aumento del nivel del agua que sugiere un daño estructural de entre el uno y el veintinueve por ciento (1 - 29%).

Se observa que la mayor parte de las edificaciones de la subcuenca no sufrirá daño estructural por la profundidad de la inundación (i.e. daños esperados menores al 10%), sin embargo se deberá prestar atención a las manzanas en donde las edificaciones pueden sufrir un grado estructural mayor del 10% (i.e. manzanas en color morado y magenta) teniendo en cuenta que la estructura no colapsará por esta causa pero ante constantes impactos sufrirá debilitamiento y su habitabilidad puede verse comprometida.

En la Figura 6-54 se observa que la velocidad de la inundación en las áreas de influencia de las manzanas de la subcuenca rara vez supera $1m/s$ por lo cual no se revisten daños a las edificaciones. Hay que tener en cuenta que las velocidades mayores a $1m/s$ pueden poner en riesgo las construcciones ligeras o refugios, así como a los vehículos y sus ocupantes.

6.8 Resiliencia en la subcuenca “Salitre Bombeo” ante eventos de inundación

La resiliencia en la subcuenca “Salitre Bombeo” para el caso de afectaciones por inundación vendrá dada mediante el análisis de los índices propuestos en la metodología RPIU: Índice de disponibilidad de servicios de atención primaria, Asentamientos precarios, Capacidad de respuesta ante desastres repetitivos y el Índice de transferencia y retención del riesgo financiero.

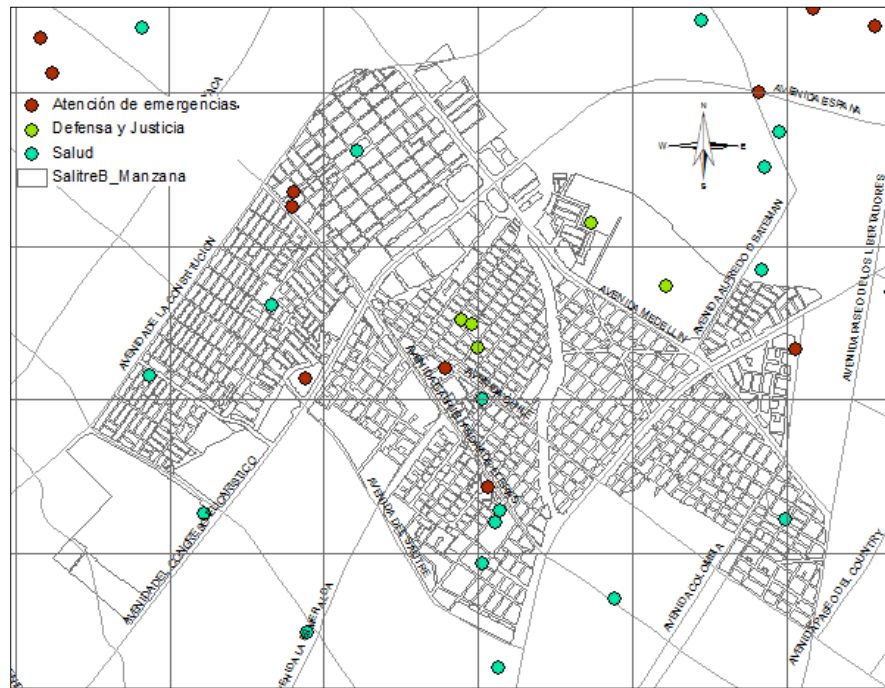
En la subcuenca “Salitre Bombeo” por encontrarse en una zona central del área metropolitana de la ciudad de Bogotá D.C., cuenta con una amplia red de centros de atención de salud, atención de emergencias y seguridad ciudadana. En los $8.86km^2$ de la subcuenca se ubican los siguientes puntos de atención en salud, Tabla 6-21:

Tabla 6-21: Centros de atención en salud en la subcuenca “Salitre Bombeo”

NOMBRE	DIRECCION	SUBSECTOR	TIPO	BARRIO
CAMI 25 LAS FERIAS	CL 76 64 08	ATENCION BASICA	CAMI	LAS FERIAS OCCIDENTAL
UPA BELLAVISTA	KR 61 A 68 74	ATENCION BASICA	UPA	BELLAVISTA OCCIDENTAL
CAMI ESTRADA	CL 65A 62 08	ATENCION BASICA	CAMI	BOSQUE POPULAR
UPA SAN FERNANDO NO. 27	CL 72 47 75	ATENCION BASICA	UPA	SAN FERNANDO OCCIDENTAL
UPA SALITRE	AV 68 CL 63	ATENCION BASICA	UPA	JARDIN BOTANICO
HOSPITAL LORENCITA VILLEGAS DE SANTOS	CL 68 KR 40	HOSPITALES	HOSPITAL NIVEL I	POPULAR MODELO
HOSPITAL JUAN XXIII	CL 76 22 10	HOSPITALES	HOSPITAL NIVEL I	JUAN XXIII
CAA NORTE	KR 40 65 73	ATENCION BASICA	CAA	POPULAR MODELO

Asimismo otros puntos de importancia ante una emergencia en la cuenca “Salitre Bombeo” y en general para toda la ciudad de Bogotá D.C. son: la sede de la Cruz Roja Colombiana Seccional Cundinamarca y Bogotá ubicada en la Avenida Carrera 68 # 68B-31, el centro de emergencias de la Defensa Civil ubicado en la Carrera 27A # 52A-02, el FOPAE cuya sede se localiza en la Diagonal 47 No.77B-09 int11 y la Unidad Administrativa Especial Cuerpo Oficial de Bomberos de Bogotá se localiza en la Carrera 7 No. 32-33. A partir de esta información, se considera que la subcuenca “Salitre Bombeo” tiene buena disponibilidad de servicios de atención primaria y que ante una emergencia por inundación será posible que las personas afectadas reciban atención oportuna.

Figura 6-55. Localización de centros de salud, atención de emergencias y defensa en la subcuenca “Salitre Bombeo”.



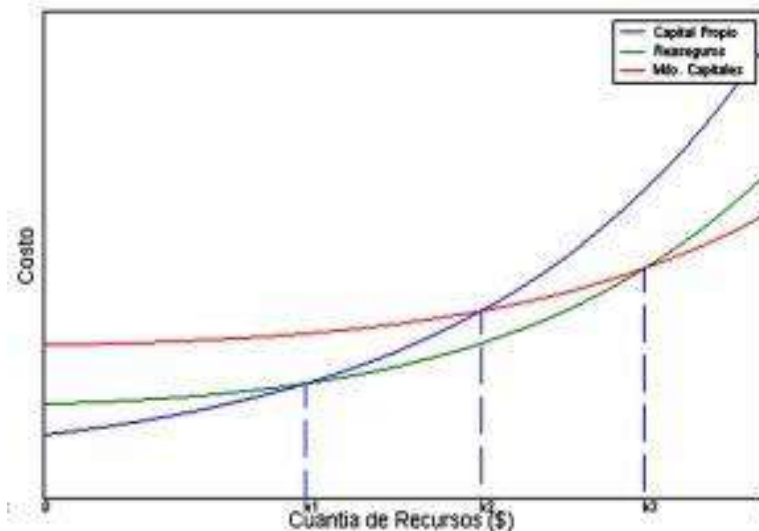
De acuerdo con la revisión de las condiciones de vida en la subcuenca “Salitre Bombeo” se considera que no existe ningún asentamiento precario en el sector en el momento, por consiguiente este indicador no se considera en el presente análisis de condiciones actuales. No obstante es importante destacar que el proceso de desplazamiento campesino que ha vivido el país durante décadas supone la presencia ocasional de personas desplazadas instauradas en condiciones precarias en diversos puntos de Bogotá D.C. lo cual debe ser considerado por las entidades distritales y nacionales. En este sentido, no existen reportes de las personas sin vivienda formal que habitan en las calles de la ciudad de Bogotá D.C. por lo cual este análisis deberá ser considerado por las entidades distritales con el objeto de garantizarles puntos seguros ante emergencias e iniciar el proceso de vinculación con la sociedad y los derechos ciudadanos.

La capacidad de respuesta de los elementos sociales a nivel de UPZ en la subcuenca “Salitre Bombeo” dependerá fundamentalmente de la organización comunitaria que pueda darse entre los elementos sociales. Un aspecto que facilita las actuaciones de la comunidad a adquirir una actitud resilientes es la capacidad con la que el grupo pueda obtener recursos económicos, por lo cual se necesitará tanto de voluntad como de capital para poderse armar contra el nivel de riesgo potencial identificado.

Con relación a la transferencia y la retención del riesgo financiero en la subcuenca “Salitre Bombeo” esta es una temática poco abordada, no obstante se puede seguir el ejemplo de la ciudad de Manizales. De acuerdo con Cardona (2007), los cambios rápidos en el sector financiero están permitiendo la aparición de nuevas alternativas para enfrentar las pérdidas causadas por fenómenos peligrosos como los terremotos,

huracanes, inundaciones, entre otros. El mercado de capitales es global y permite la posibilidad de que se puedan realizar inversiones en diferentes sitios del mundo. La combinación de los nuevos conocimientos y técnicas de la ingeniería y la ciencia, lo que incluye la modelización más precisa de pérdidas y un mejor entendimiento científico del riesgo, los avances en la computación y la tecnología de la información y las innovaciones en el mercado financiero, están abriendo nuevos horizontes y nuevas fuentes de capital para enfrentar las pérdidas debidas a desastres.

Figura 6-56. Curva de transferencia del riesgo. Cardona (2007).



De acuerdo con ERN-Manizales. (2005). “desde el punto de vista financiero, la gestión de riesgos ha sido un proceso que involucra cinco pasos: i) identificar y analizar el riesgo; ii) examinar la factibilidad de alternativas o técnicas para su reducción; iii) seleccionar las mejores técnicas disponibles y factibles; iv) implementar las técnicas escogidas; y v) darle seguimiento al programa. Aunque aparentemente es un proceso similar al que se propone desde la perspectiva de las ciencias aplicadas y sociales, en realidad el riesgo desde el punto de vista financiero se refiere al potencial de pérdidas económicas y la reducción del mismo se basa en la implementación de medidas que permitan contar con recursos económicos en el momento en que se presente un desastre y se puedan cubrir total o parcialmente dichas pérdidas. En otras palabras, desde el punto de vista financiero, la gestión del riesgo tiene como objetivo identificar y analizar las exposiciones de pérdida, examinando las posibilidades de transferencia y retención de esas pérdidas, llevando a cabo las transacciones del caso y estando atentos a los cambios o ajustes que deban realizarse. Esto involucra la industria de seguros y reaseguros, la titularización y otros esquemas financieros utilizados o que se podrían explorar para integrarlos a una gestión integral del riesgo colectivo desde una visión multisectorial, interinstitucional y multidisciplinaria. Los mecanismos disponibles en los mercados de seguros y de capitales no son sustituibles entre sí, sino que son complementarios y se deben usar simultáneamente en una estructura combinada que cubra diferentes capas de riesgo. Dentro de esta estructura participan distintos tipos de agentes, entre ellos, empresas

aseguradoras, reaseguradoras, inversionistas privados, banca de inversión, intermediarios financieros y entidades multilaterales, lo cual implica que, aunque existe esta estructura institucional, el marco regulador del uso de este tipo de instrumentos está por fuera de la esfera nacional de los países. En resumen, mecanismos como el aseguramiento o la transferencia de pérdidas al mercado de capitales permiten disminuir la carga fiscal de los gobiernos una vez ha ocurrido un desastre”.

6.9 Alternativas factibles de mitigación del riesgo potencial de inundación en la subcuenca “Salitre Bombeo”

De acuerdo con las condiciones actuales de la subcuenca “Salitre Bombeo” analizadas con la metodología RPIU y las principales conclusiones derivadas de los Estudios de Actualización del Plan Maestro de Alcantarillado de las Cuencas de los ríos Fucha, Salitre y Jaboque (EAAB-HMV, 2003), se enfatiza que se debe priorizar el manejo del alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo” en el siguiente sentido:

- Que el agua servida no se devuelva a las casas ni a las vías y que las conducciones no vayan a presión.
- Que en tiempo seco no se viertan las aguas servidas a los cuerpos abiertos solucionando el incorrecto funcionamiento de los alivios.
- Que en época de lluvias se llegue a una dilución aceptable en los canales.

Adicionalmente, y aunque la calidad del agua no es una temática que se enfatiza en la presente investigación, se debe considerar que una de las prioridades sea alcanzar una mejor calidad del agua en los efluentes, por lo que el tratamiento de las aguas sanitarias que llegan al final del tubo por los interceptores y las aguas lluvias y combinadas en los canales requerirán sistemas de tratamiento diferentes. Esta visión de solucionar la capacidad hidráulica del sistema haciendo un sistema de mayores dimensiones y tratamientos al final del tubo es insostenible para cualquier ciudad, por consiguiente se deberá seguir un criterio que permita alcanzar los objetivos de un forma razonable, por lo que se enfatiza en articular un Sistema de Drenaje Urbano Sostenible para dar solución a las problemáticas de drenaje de la subcuenca “Salitre Bombeo” y en general a la totalidad de subcuencas urbanas.

De acuerdo con Van-Der-Steen (2006), se proponen cuatro principios que se deben cumplir, al implementar un manejo integrado y sostenible del sistema de drenaje (González, 2009):

- Mejoramiento de la calidad de vida de la población: las medidas implementadas, deben ser óptimas en términos sociales, económicos, ambientales y de salud pública.
- Participación de todos los sectores involucrados, especialmente de los consumidores: Se deben tomar decisiones informadas, consistentes con los

objetivos del saneamiento, balanceando los derechos y las responsabilidades de la comunidad.

- Manejo holístico del agua en la cuenca urbana: Minimización del agua residual producida, y del agua cruda tomada para consumo. Igualmente, se debe promover el re-uso del agua en la cuenca.
- El saneamiento del agua residual se debe hacer en áreas tan pequeñas como sea posible: se debe usar la mínima cantidad posible de agua para transportar los residuos, y se deben implementar medidas de control en la fuente, control local y control regional.

Una estrategia de mitigación que se puede llevar a cabo es la descrita en UPES & HIDROTEC (1999), con relación a los diseños hidráulicos del sistema Córdoba- Juan Amarillo- Jaboque y Diseño de la Laguna en el Humedal Juan Amarillo, en donde se desarrollaron estudios complementarios del funcionamiento hidráulico de la cuenca con el fin de definir el comportamiento de los humedales como amortiguadores de crecientes y con base en ello diseñar las obras requeridas para el manejo de caudales en cada uno de ellos. Como ejemplo se presenta el humedal de Córdoba, el cual tiene un área aproximada de 40 ha, las cuales han sido fraccionadas por el cruce de las avenidas Suba y 127 (Herrera et al., 2004). Aun cuando existen problemas de contaminación y disminución de su ronda hidráulica, el humedal de Córdoba atenúa hasta en un 34% los caudales con período de retorno de 100 años, lo que justifica su integración en el sistema de drenaje de la ciudad. Aunque la calidad de sus aguas no es óptima, este es el humedal que presenta mayor diversidad y presencia de especies vegetales y animales en la ciudad. Diversos estudios han demostrado que el humedal de Córdoba es uno de los humedales con mayores posibilidades de recuperación, debido principalmente a que su nivel de degradación es relativamente bajo (DAMA, 2006). Entre las medidas que se han sugerido para recuperar el humedal, y aprovechar su capacidad de asimilación de carga contaminante se encuentran (Herrera et al., 2004): la interconexión de los tres sectores en los que se encuentra dividido, la construcción de una estructura de salida que mantenga los niveles en el humedal, la construcción de un sistema de tratamiento primario, ubicado en el ingreso de los canales Córdoba y los Molinos, la construcción de sedimentadores o trampas de sólidos, remoción de basuras y recuperación de la vegetación natural, entre otras. La implementación de las medidas descritas permitiría recuperar la capacidad de remoción del humedal (Ramírez, 2002), para así integrarlo al sistema de drenaje y tratamiento de las aguas combinadas de la ciudad.

Como complemento a la articulación de los humedales del sistema de alcantarillado, es posible implementar sistemas de amortiguación a baja escala que permitan una racionalización del recurso hídrico como los dispuestos en la Tabla 4-14, los cuales permitiría una atenuación del pico igual o mayor al 59% (i.e. en el caso del filtro de superficie de arena) y un tiempo de retraso promedio igual o mayor a 92 minutos (i.e. en el caso del sistema de bioretención Bio II).

7 Análisis de los resultados de la aplicación de la metodología RPIU para los escenarios planteados

En el presente capítulo se presentan y analizan los resultados de la aplicación de la metodología RPIU en la subcuenca “Salitre Bombeo”. Inicialmente se aborda la amenaza por inundación en la mencionada subcuenca, por medio del análisis de la falla funcional y estructural del sistema de alcantarillado combinado para posteriormente establecer como se comporta la escorrentía y los encharcamientos en la subcuenca. Posteriormente, para cada uno de los escenarios planteados (i.e. proyecciones a 2020, 2030 y 2051) se analizan las condiciones de vulnerabilidad total en la subcuenca y se estima el valor de riesgo público por inundación, especificando la perspectiva temporal de operatividad del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.

7.1 Amenaza por inundación en la subcuenca “Salitre Bombeo”

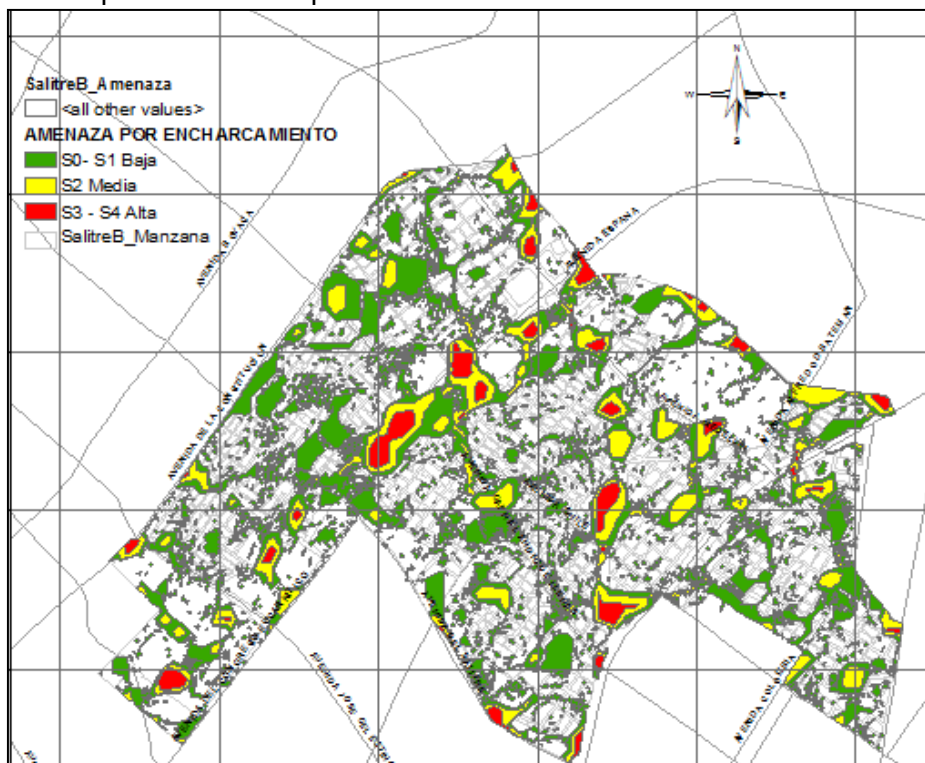
La evaluación de la amenaza por inundación y encharcamiento en la subcuenca “Salitre Bombeo” es el producto de las modelaciones propuestas en la metodología RPIU, para lo cual se caracterizó hidrológicamente (i.e. numeral 6.3) e hidráulicamente la subcuenca (i.e. numeral 6.4.1), para posteriormente realizar la simulación hidrodinámica con el modelo *Iber* (i.e. numeral 6.4.2) y la simulación hidráulica del sistema de alcantarillado con caudales residuales y combinados con el modelo EPA SWMM 5.0. (i.e. numeral 6.5.1).

A partir de los resultados de calados provenientes del análisis hidrodinámico y del análisis de la evaluación de la capacidad hidráulica de la red de alcantarillado de la subcuenca para los periodos de retorno seleccionados (i.e. TR 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años), se identificaron los tramos en donde se presenta saturación del sistema de alcantarillado combinado y por ende los pozos y estructuras a través de los cuales existe un reflujo de caudal hacia la superficie. Con esta información se creó el mapa de amenaza por inundación de la subcuenca “Salitre Bombeo”.

Para la consecución del mapa de amenaza se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El mapa de amenaza de la subcuenca “Salitre Bombeo” generado a partir de la herramienta *Iber* considera como insumo la precipitación en la subcuenca, es decir se representa el encharcamiento máximo dentro de la subcuenca una vez que el sistema de alcantarillado trabaja a máxima capacidad.
- La calidad de la simulación hidrodinámica depende en gran medida de la calidad de los datos topográficos o del modelo digital de elevación empleado, por consiguiente se deben tener en cuenta las restricciones de uso que se plantean en el numeral 6.7.1.
- En relación con la amenaza fluvial, se considera acertada la información contenida en el POT 2000 cuyo shape fue desarrollado por el FOPAE, en donde no se considera amenaza por inundación por desborde de los canales Salitre y Río Negro.
- El nivel de amenaza corresponde a la escala propuesta en el numeral

Figura 7-1. Mapa de amenaza por encharcamientos en la subcuenca “Salitre Bombeo”.



El mapa de amenaza de la subcuenca “Salitre Bombeo” evidencia áreas afectadas por encharcamientos e inundaciones en donde los niveles, velocidad y duración de las aguas de tipo combinado afectan a los elementos vulnerables de la subcuenca. En la Figura 7-1 se evidencian áreas en las cuales se presentan encharcamientos e inundaciones de nivel de severidad entre S0 y S3, de acuerdo con la clasificación previamente descrita en la Tabla 4-3 y cuyas principales características de afectación son:

En las áreas de color verde o de baja amenaza distribuidas en toda la subcuenca (i.e. $< 0.5 m$), se pueden esperar encharcamientos en donde la severidad es de tipo S0, es decir donde la profundidad es menor a $1m$, la velocidad menor a $1.5m/s$ y el parámetro

de vuelco menor a $0.5 m^2 / s$ (i.e. producto de la profundidad y la velocidad del flujo). Se caracterizan por ser áreas en las que no se esperan víctimas pero en donde la lámina de agua sí puede superar algunos andenes y afectar el tránsito de personas, especialmente de niños y adultos mayores. Las vías se encharcan y la velocidad de flujo de los vehículos se ve disminuida por precaución. En las viviendas el agua puede llegar hasta los sótanos.

En las áreas de color amarillo o de amenaza media (i.e. $0.5m - 1.5m$) se presentan encharcamientos recurrentes y se caracterizan por ser zonas deprimidas en donde pueden esperarse afectaciones con severidad S1 y S2, es decir severidad entre leve y media, en donde la profundidad es menor a $1m$, la velocidad menor a $1.8m / s$ y el parámetro de vuelco menor a $1 m^2 / s$. Ante este tipo de afectación los niños y adultos mayores pierden la habilidad de desplazarse. Los vehículos se ven afectados, debiendo detener su recorrido y el tránsito tiende a colapsar. Los primeros pisos de las viviendas se ven afectados por la entrada de la lámina de agua y se afectan los enceres y los vehículos ubicados en los sótanos.

En las áreas de color rojo o de amenaza alta (i.e. $1.5m - 2.5m$) se presentan inundaciones de severidad S3, es decir severidad elevada, en donde la profundidad puede ser mayor a $1m$, la velocidad mayor a $1.8m / s$ y el parámetro de vuelco es mayor a $1 m^2 / s$. Ante este tipo de afectación los niños y adultos mayores deben ser asistidos para evacuar. Los vehículos se ven fuertemente afectados, el tránsito colapsa por completo y los vehículos tienden a flotar. Los enceres ubicados en el primer piso de las viviendas y de los sótanos se determinan como pérdida total.

Como puntos críticos por amenaza alta de encharcamientos se identificaron los siguientes en la subcuenca “Salitre Bombeo”:

- Se evidencia una fuerte afectación en el corredor vial de la Avenida Carrera 68, cuyo lento drenaje, sumideros obstruidos, afectaciones en la carpeta asfáltica y cierres viales, hacen que en tiempo húmedo sea una vía de tránsito lento y alta congestión vehicular.
- El área posterior al centro comercial Metrópolis, la cual se caracteriza por su topografía baja y plana. Asimismo, los pozos de este sector presentan refluo hacia la vía por efectos del incorrecto funcionamiento del alivio del interceptor río Nuevo hacia el Canal Salitre. Se presenta proliferación de vectores peligrosos para la salud en el canal de entrega del mencionado alivio.
- El área circundante a la Estación Elevadora Salitre, la cual se encuentra en un sector particularmente bajo en donde llegan la totalidad de interceptores de la subcuenca y cuyas aguas son elevadas al canal Salitre. Es un punto en donde se encuentra la confluencia de dos canales a cielo abierto, el río Salitre y el río Negro, los cuales conducen aguas combinadas durante todo el año.
- El sector cercano a la intersección de la Avenida NQS (i.e. Carrera 30) con el canal Salitre en su costado occidental, en donde se presentan un área

particularmente baja y cuyos alivios conectados al canal Salitre se presentan afectados por antropobarreras.

En la Figura 7-2 se clasifican los valores de amenaza máximos para cada manzana de la subcuenca “Salitre Bombeo”.

Figura 7-2. Mapa de amenaza por encharcamientos para cada manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo”.



7.2 Escenario 1: Condición actual

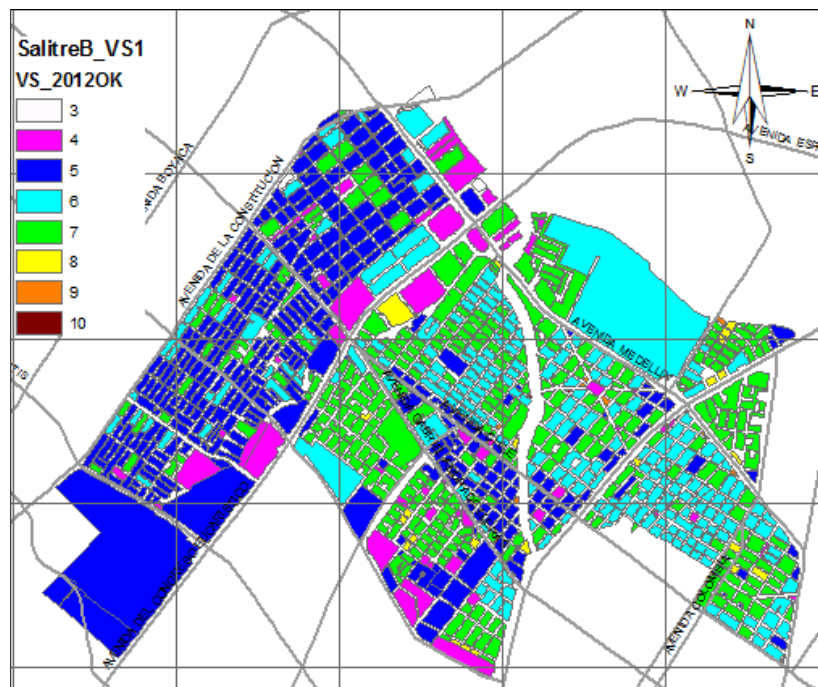
Las condiciones actuales de la subcuenca “Salitre Bombeo” corresponden a los resultados del análisis de los índices e indicadores de la metodología RPIU presentados en el capítulo 6. En el presente numeral se establecen los niveles de vulnerabilidad social, vulnerabilidad física del área de estudio, la vulnerabilidad funcional y estructural del sistema de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo” para el año 2012 con la información más actual disponible.

7.2.1 Nivel de vulnerabilidad social

Se establece que las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” en donde se observa una mayor vulnerabilidad social son aquellas en las que la densidad poblacional es alta, el uso del suelo incluye el residencial, el estrato es menor y se esperan afectaciones por la altura, duración y velocidad del agua sobre las personas.

Debido a que los escenarios de análisis buscan establecer la influencia de la dinámica poblacional en la subcuenca de estudio, el valor de la densidad poblacional (i.e. VS_D_DP) tiene alta relevancia. En el análisis del índice demográfico (i.e. VS_D) el indicador de la densidad poblacional se calcula con un factor de 0.7, en tanto el índice de dependencia demográfica (i.e. VS_D_DD), el indicador de densidad de lugares especiales de alojamiento (i.e. VS_D_LEA) y el indicador de la densidad de establecimientos educativos y de salud (i.e. VS_D_E&S) se les asignó una ponderación de 0.1 c/u. En el caso del índice de condiciones de vida (i.e. VS_CV) y el índice de exposición humana (i.e. VS_EH) cada uno los indicadores que los componen fueron valorados con el mismo factor en función de la cantidad de indicadores que componen el índice. Finalmente, para la consecución de la vulnerabilidad social en cada manzana se asignó una ponderación de 0.5 al índice demográfico (i.e. VS_D), 0.25 para el índice de condiciones de vida (i.e. VS_CV) y 0.25 para el índice de exposición humana (i.e. VS_EH). Todos los índices e indicadores fueron normalizados en una escala de 1 a 10, por lo que las manzanas con valores cercanos a 10 corresponden a aquellas con mayor vulnerabilidad social en la subcuenca, Figura 7-3.

Figura 7-3. Vulnerabilidad social por manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo” para las condiciones actuales.



En la Figura 7-3 se observa que la mayoría de las manzanas presentan valores de entre 4 y 7, por lo cual se infiere que a nivel de subcuenca la mayor parte de la población presenta una vulnerabilidad social media. En la Tabla 7-1 se presentan las diez manzanas de la subcuenca con mayores valores de vulnerabilidad social para las condiciones actuales y futuras. La mayor vulnerabilidad social se encuentra en la manzana de código DANE 00520606, la cual tiene la mayor densidad poblacional de la subcuenca (i.e. 11167 hab/ha), su uso es de tipo residencial con actividad económica y

su estrato es cero (0), por lo cual correspondería a una invasión del espacio público. Es de destacar que los menores valores de vulnerabilidad social en la subcuenca se relacionan por lo general con áreas de estrato cero (0), las cuales corresponden a áreas públicas en donde no deberían haber habitantes permanentes.

Tabla 7-1. Manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” con los mayores valores de vulnerabilidad social para los escenarios de análisis.

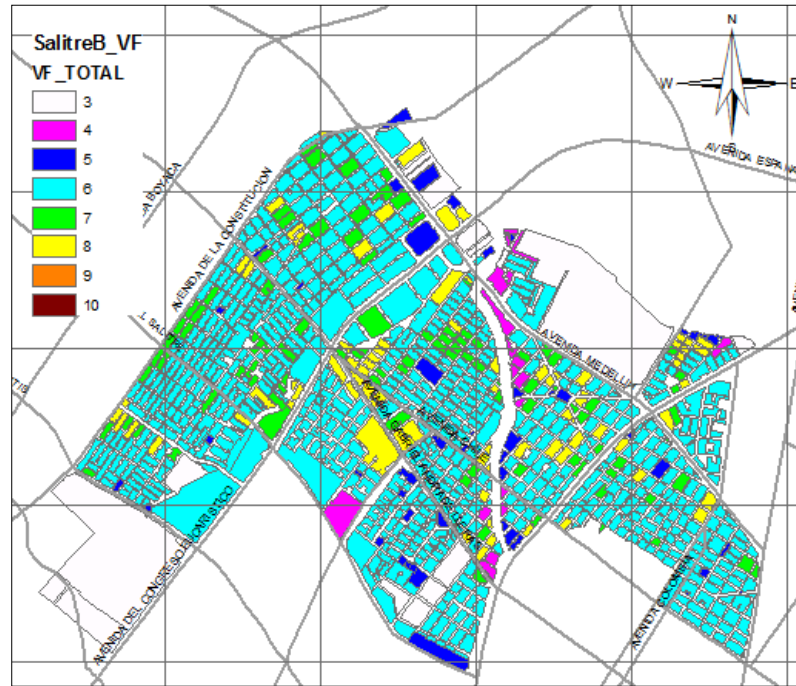
COD_NUE	Estrato	Densidad Pob (hab/ha)	Area (ha)	UPZ	VS_2012OK	VS_2020OK	VS_2030OK	VS_2051OK
00520606	0	11167	0.046	DOCE DE OCTUBRE	9.37	9.57	9.78	10.00
00520118	3	8757	0.062	DOCE DE OCTUBRE	9.12	9.28	9.44	9.61
00520122	3	7894	0.068	DOCE DE OCTUBRE	8.98	9.13	9.27	9.43
00520134	3	8016	0.184	DOCE DE OCTUBRE	8.96	9.11	9.26	9.42
00740617	3	7484	0.074	LOS ALCAZARES	8.75	8.89	9.03	9.17
00530521	3	3683	0.148	LOS ANDES	8.66	8.78	8.91	9.03
00520309	3	6618	0.085	DOCE DE OCTUBRE	8.66	8.73	8.80	8.87
00740207	3	6749	0.093	LOS ALCAZARES	8.19	8.32	8.44	8.57
00520123	0	8421	0.061	DOCE DE OCTUBRE	8.08	8.23	8.39	8.55
00520341	0	8422	0.061	DOCE DE OCTUBRE	8.07	8.22	8.38	8.54

7.2.2 Nivel de vulnerabilidad física

Las manzanas de mayor vulnerabilidad física en la subcuenca “Salitre Bombeo” se relacionan con aquellas que presentan mayor área impermeable, la calidad de las viviendas en función de la estratificación es menor y su exposición a los efectos del aumento del nivel y velocidad del agua de inundación es mayor. Como no se espera que estas condiciones cambien en los tiempos de los escenarios de análisis, estos valores de vulnerabilidad física de la subcuenca “Salitre Bombeo” se consideran constantes. Todos los índices e indicadores fueron normalizados en una escala de 1 a 10, por lo que las manzanas con valores cercanos a 10 corresponden a aquellas con mayor vulnerabilidad física en la subcuenca.

En la Figura 7-4 se observa que aquellas manzanas que tienen una mayoría de cobertura vegetal serán menos vulnerables a los efectos de la inundación, en tanto aquellas que son predominantemente impermeables dependen completamente del sistema de alcantarillado. En relación con la altura y la velocidad del agua de la inundación y sus efectos sobre las viviendas, no se espera que con los valores encontrados se presenten daños estructurales en las edificaciones.

Figura 7-4. Vulnerabilidad física por manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo” para las condiciones actuales.



Las manzanas con mayores valores de vulnerabilidad física en la subcuenca “Salitre Bombeo” se muestran en la Tabla 7-2, en donde la UPZ Doce de Octubre es la que presenta más manzanas físicamente vulnerables en la subcuenca “Salitre Bombeo”.

Tabla 7-2. Manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” con los mayores valores de vulnerabilidad social para la condición actual.

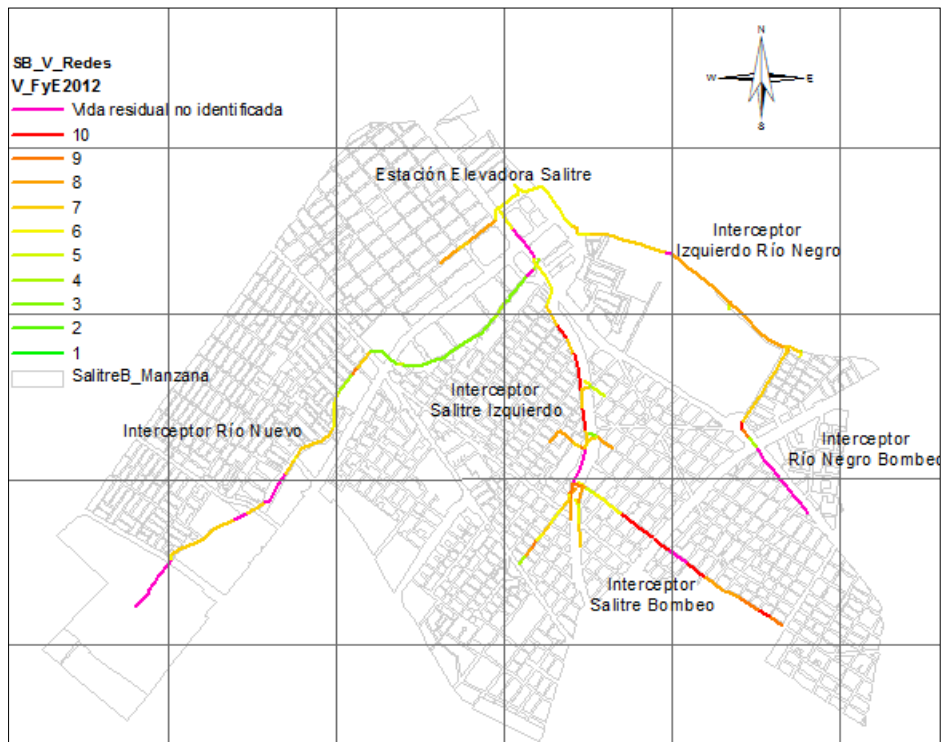
COD. NUE	ESTRATO	UPZ	ACTIVIDAD	Altura (m)	Velocidad (m/s)	VF. TOTAL
00520443	3	DOCE DE OCTUBRE	ZONA RESIDENCIAL CON ACTIVIDAD ECONOMICA	0.09	1.21	7.853
00550341	3	LAS FERIAS	ZONA RESIDENCIAL CON ACTIVIDAD ECONOMICA	1.69	0.05	7.833
00520551	3	DOCE DE OCTUBRE	ZONA RESIDENCIAL CON ACTIVIDAD ECONOMICA	0.01	1.20	7.764
00740508	3	LOS ALCAZARES	ZONA DE COMERCIO CUALIFICADO	0.03	1.09	7.637
00550340	3	LAS FERIAS	ZONA DE COMERCIO CUALIFICADO	1.49	0.00	7.578
00740155	4	LOS ALCAZARES	ZONA RESIDENCIAL CON COMERCIO Y SERVICIOS	0.05	1.26	7.519
00520542	3	DOCE DE OCTUBRE	ZONA RESIDENCIAL CON ACTIVIDAD ECONOMICA	1.13	0.11	7.382
00520126	3	DOCE DE OCTUBRE	ZONA RESIDENCIAL CON ACTIVIDAD ECONOMICA	1.10	0.03	7.248
00520304	3	DOCE DE OCTUBRE	ZONA DE COMERCIO AGLOMERADO	1.13	0.00	7.237
00520325	3	DOCE DE OCTUBRE	ZONA RESIDENCIAL CON ACTIVIDAD ECONOMICA	1.11	0.00	7.218

7.2.3 Perspectiva temporal de operación del sistema de alcantarillado troncal combinado

El análisis de los índices e indicadores de la vulnerabilidad estructural y funcional del sistema de alcantarillado troncal combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” permitieron establecer la expectativa de vida útil remanente y la capacidad de operación del sistema, como se muestra en los numerales 6.5.1 y 6.5.2. Con base en este análisis en el presente numeral se estima la perspectiva temporal de operatividad de los tramos y pozos del sistema de alcantarillado troncal combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” por medio de la ponderación de su vida útil remanente y la capacidad de operación del

elemento de análisis. Como resultado de la ponderación y normalización en una escala de 1 a 10, es posible observar los tramos que presentan la vulnerabilidad más alta, la cual se asocia a una menor perspectiva temporal de operación, Figura 7-5.

Figura 7-5. Vulnerabilidad funcional y estructural de la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo”.



De acuerdo con lo observado en la Figura 7-5 se establece que los tramos de la red troncal del sistema de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” que presentan una mayor vulnerabilidad y por ende una menor perspectiva temporal de operación se localizan en el interceptor Salitre Bombeo y en el interceptor Salitre Izquierdo. No obstante, como técnica y económicamente no será posible realizar la renovación de las redes y pozos en un mismo momento, estas acciones se deberán priorizar dentro de una estrategia de la empresa prestadora del servicio de alcantarillado (i.e. para Bogotá D.C. la EAAB) articulándolo con soluciones de tipo SDUS. La presente investigación propone, desde un punto de vista netamente técnico en función de la información analizada, realizar la renovación del sistema buscando minimizar la vulnerabilidad aquí planteada garantizando la operatividad del sistema de alcantarillado a futuro. La Tabla 7-3 contiene los 10 tramos de red más críticos, los cuales para el escenario actual han superado su vida útil estructural y presentan fallas de tipo operacional, incluso con lluvias de periodo de retorno menores a 3 años.

Tabla 7-3. Tramos de tubería de la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” con menor perspectiva temporal de operación.

Tramo	Red	Material	Vida útil (años)	Año instalación	Capacidad operacional
CLT67674	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión
CLT66305	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión
CLT66308	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión
CLT68437	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión
CLT67450	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión
CLT67799	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión
CLT67800	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión
CLT67801	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión
CLT68453	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión
CLT70491	TRONCAL	Mampostería	40	1933	Trabajando a presión

Las tuberías de la red troncal de la subcuenca “Salitre Bombeo” de las cuales la EAAB no tiene registro de su fecha de instalación corresponden al interceptor de la Carrera 68 D Bellavista Occidental del interceptor río Nuevo y al interceptor Salitre en el tramo aguas abajo del alivio del interceptor río Nuevo al Canal Salitre, especificadas en la Tabla 7-4. Por medio de la simulación hidráulica con el modelo EPA SWMM 5.0 se conoce que estas tuberías están trabajando a presión en tiempo húmedo con lluvias de periodo de retorno de 3 años, por lo cual se recomienda su revisión detallada e intervención.

Tabla 7-4. Tuberías de la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” con fecha de instalación indeterminada y trabajando a presión.

Tramo	Red	Material	Capacidad de operación TR3 años
CLT68350	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLT67742	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLT68322	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLT67743	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLT67695	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLT67740	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLT74037	TRONCAL	Concreto	Más de 85% de la capacidad hidráulica
CLB47296	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLB47276	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLB47263	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLB47264	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLT73035	TRONCAL	Gres	Trabajando a presión
CLT73252	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLT73255	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLT73802	TRONCAL	Concreto	Trabajando a presión
CLBN118	TRONCAL	Concreto	Más de 50% de la capacidad

Para el caso de los pozos, la Figura 7-5 contiene los diez (10) pozos más críticos y existen en total diecisiete (17) en similares condiciones: construidos en mampostería y con fecha de instalación de 1933, de acuerdo con los registros de la EAAB. Tras una inspección de los funcionarios de la EAAB es probable que estos pozos requieran intervención estructural.

Tabla 7-5. Pozos de la red troncal de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” con menor perspectiva temporal de operación.

Pozo	ID Elemento	Fecha Instalación	Dirección	Vida residual teórica
CMP57920	5000238714	30/06/1933	KR 43 AC 72	Superada hace 39 años
CMP57861	5000238643	30/06/1933	KR 28 AC 80	Superada hace 39 años
CMP57779	5000238539	30/06/1933	TV 45 CL 73	Superada hace 39 años
CMP57777	5000238537	30/06/1933	KR 30 AC 80	Superada hace 39 años
CMP57753	5000238507	30/06/1933	KR 44 CL 73	Superada hace 39 años
CMP57745	5000238499	30/06/1933	KR 30 AC 80	Superada hace 39 años
CMP57731	5000238484	30/06/1933	TV 45 CL 73	Superada hace 39 años
CMP57722	5000238472	30/06/1933	KR 44 CL 73	Superada hace 39 años
CMP57721	5000238470	30/06/1933	KR 44 CL 73	Superada hace 39 años
CMP57700	5000238443	30/06/1933	KR 31 AC 80	Superada hace 39 años

7.2.4 Nivel de vulnerabilidad total

El nivel de vulnerabilidad total en las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” indica aquellas áreas en donde la densidad poblacional generalmente es mayor y las condiciones sociales y del territorio son más desfavorables, por lo cual aumenta su predisposición a sufrir los efectos de la amenaza por encharcamiento o inundación. Se debe tener en cuenta que la vulnerabilidad total nace de la confluencia de múltiples y variados parámetros de la problemática (i.e. representados en la presente investigación por índices e indicadores) por lo cual su nivel de vulnerabilidad se verá incrementado al pasar el tiempo si no son subsanadas aquellas características que lo hace vulnerable. La Figura 7-6 presenta el nivel de vulnerabilidad total de las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” para las condiciones actuales.

Figura 7-6. Vulnerabilidad total por manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo” para las condiciones actuales.

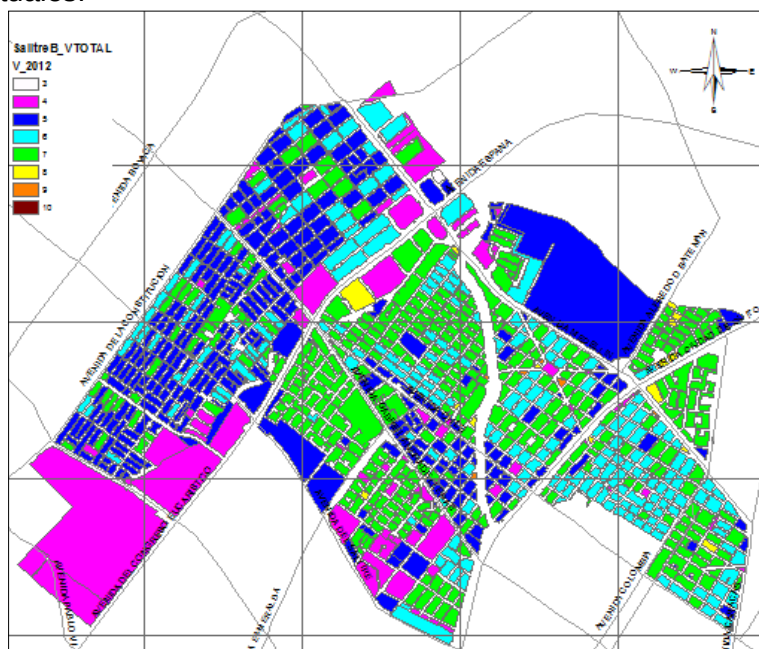


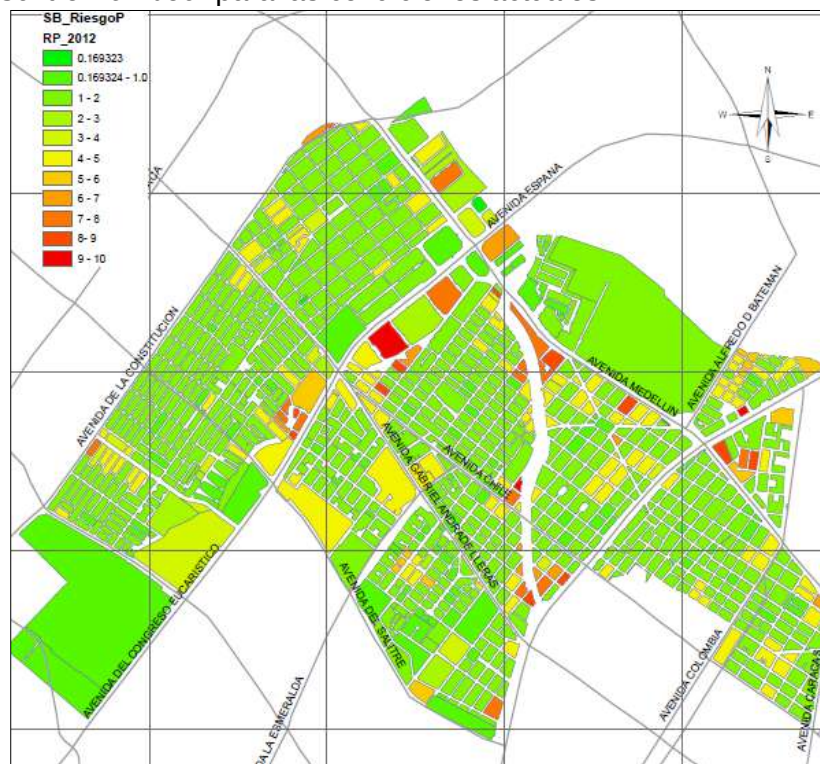
Tabla 7-6. Manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” con los mayores valores de vulnerabilidad total para la condición actual y escenarios futuros.

COD_NUE	V_2012	V_2020	V_2030	V_2051
00520118	8.5293	8.6556	8.7870	8.9235
00520606	8.5211	8.6822	8.8496	9.0238
00520134	8.4712	8.5868	8.7070	8.8320
00520122	8.4675	8.5814	8.6998	8.8229
00740617	8.2798	8.3878	8.5000	8.6167
00520309	8.0043	8.0998	8.1990	8.3022
00530521	7.8406	7.8937	7.9490	8.0064
00740207	7.7890	7.8864	7.9876	8.0928
00530508	7.7354	7.8043	7.8760	7.9505
00520325	7.6995	7.7483	7.7991	7.8519

7.2.5 Nivel de riesgo público por inundación – Condición actual

Una vez conocidos los resultados parciales de la vulnerabilidad y de la amenaza por inundación en las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo”, se procede a determinar su nivel de riesgo potencial actual, es decir el nivel de riesgo actual sin establecerse en la actualidad un nivel de resiliencia ni acciones de mitigación que permitan aminorar sus efectos, Figura 7-7.

Figura 7-7. Riesgo potencial de encharcamiento o inundación por manzana en la subcuenca “Salitre Bombeo” para las condiciones actuales.



La Tabla 7-7 muestra las 10 manzanas con mayor riesgo público por inundación en la subcuenca, en donde se esperan las mayores afectaciones. Se identifica que existen

varias manzanas sobre el eje de la Avenida Carrera 68 que presentan niveles altos de riesgo, así como en el eje del canal Salitre y la manzana ubicada detrás de la Estación Elevadora Salitre. Los niveles de severidad y su vulnerabilidad deberá ser atendida a la brevedad en busca de mitigar su nivel de riesgo, para lo cual es inminente articularlas dentro de las áreas a implementar sistemas de drenaje urbano sostenible y en el futuro monitorear su nivel de riesgo efectivo.

Tabla 7-7. Manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” con los mayores valores de riesgo potencial para la condición actual y escenarios futuros.

COD_NUE	RP_2012	RP_2020	RP_2030	RP_2051
00520325	9.8059	9.8681	9.9328	10.0000
00530528	9.4280	9.4765	9.5270	9.5795
00520706	9.2359	9.2427	9.2498	9.2572
00740155	8.9494	8.9515	8.9538	8.9561
00520301	8.8306	8.8645	8.8998	8.9365
00550341	8.7452	8.7512	8.7575	8.7641
00520551	8.6237	8.6434	8.6639	8.6852
00520542	8.5055	8.5099	8.5145	8.5194
00520443	8.4615	8.4702	8.4793	8.4887
00520126	8.3871	8.3918	8.3966	8.4017

7.3 Escenario 2: Proyección a 2020

Para el año 2020 las proyecciones de población en las manzanas de la subcuenca “Salitre Bombeo” indican un crecimiento de la población que depende de la dinámica poblacional de la UPZ en la que se localizan. El mayor crecimiento poblacional se estima para las manzanas de la UPZ Doce de Octubre (i.e. 11% en diez años) y el menor en las manzanas dentro de la UPZ La Ferias (i.e. 3% en diez años). De acuerdo con el POT 2000 dentro de la subcuenca se encuentra un área de desarrollo de 2.35 ha en la manzana de código DANE 00510105, por consiguiente se asume que la población en esta manzana se incrementará en función del área proyectada, en donde esta manzana pasa de una densidad poblacional de 273 hab/ha en el año 2012 a 482 hab/ha en el año 2020.

En relación con la perspectiva temporal de las redes y pozos del sistema de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo”, los más afectados al año 2020 serán los tramos de mayor vulnerabilidad del interceptor Salitre Bombeo y del interceptor río Negro Bombeo, situación que se presentará porque su vida útil remanente será superada y porque la insuficiencia hidráulica que presentan los tramos que trabajan a presión afectarán considerablemente la estructura del sistema. En este sentido, se esperan constantes afectaciones en las vías producto de las aguas de reflujo en los interceptores que trabajan a presión de acuerdo con la modelación hidráulica realizada en EPA SWMM 5.0. La totalidad de los pozos de los mencionados interceptores, están contruidos en mampostería, por lo tanto la EAAB deberá verificar su estado estructural debido a la influencia de los vapores de las aguas combinadas, las cuales pueden llegar

a generar daño estructural y colapso de la estructura. El riesgo público por inundación para este escenario en cada una de las manzanas de la subcuenca se incrementa en relación con su nivel de amenaza máximo mostrado en la Figura 7-2 y su vulnerabilidad total, la cual registra un incremento en función de la mayor densidad de población, por lo cual el nivel de riesgo total aumenta paulatinamente con respecto a lo determinado para el escenario actual, como se muestra en la Tabla 7-7.

7.4 Escenario 3: Proyección a 2030

Para el año 2030 la población de cada manzana registra un aumento de acuerdo su localización en las UPZ de la subcuenca “Salitre Bombeo”, siguiendo la tendencia registrada para el año 2020. Al no existir información de zonas de desarrollo adicional a la establecida en el POT 2000, se asume que la densidad poblacional para el escenario 2030 y 2051 se incrementará únicamente en función de la población proyectada para cada UPZ, permaneciendo el territorio en iguales condiciones que en el escenario 2. En relación con el sistema de alcantarillado troncal combinado para el año 2030, la vida útil de las redes y pozos de los interceptores Salitre Bombeo, Salitre Izquierdo y río Negro Bombeo han sido superados. La situación del reflujo en periodos húmedos es menor en el interceptor Salitre Izquierdo debido a que la cota clave de las tuberías del sistema se encuentra más profunda que para el interceptor Salitre Bombeo. En este escenario, el sector inicial del interceptor río Nuevo se encuentra funcionando a presión en tiempo húmedo y la entrega del alivio al canal Salitre, la cual se encuentra actualmente funcionando incorrectamente, puede ver agravada la situación en el interceptor al captar el flujo del canal Salitre. Nuevamente el riesgo público por inundación para este escenario se incrementa en función del nuevo nivel de vulnerabilidad total, el cual depende principalmente del incremento de la densidad de población, por lo cual el nivel de riesgo potencial aumenta gradualmente con respecto a lo determinado para el escenario previo, como se muestra en la Tabla 7-7 y se espera pueda verse disminuido con los niveles de implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible dentro de la subcuenca.

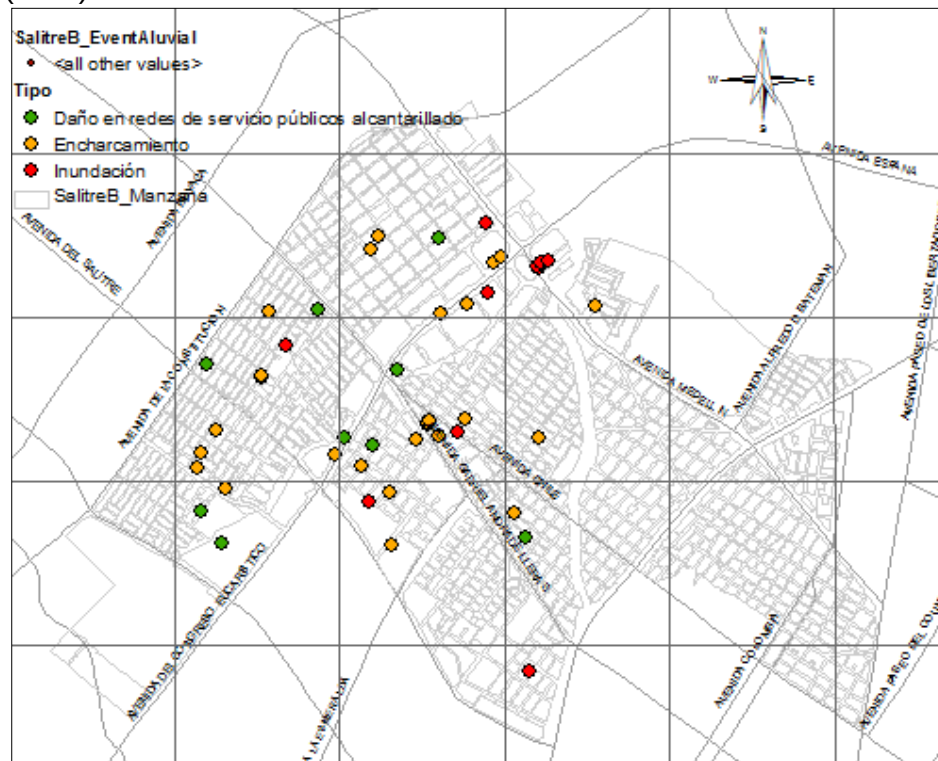
7.5 Escenario 4: Proyección a 2051

Para el escenario final se estima que la subcuenca ha alcanzado su población de saturación 2051. De acuerdo con el análisis de perspectiva temporal de operación del sistema de alcantarillado combinado, los tramos de la subcuenca “Salitre Bombeo” que mayor expectativa de vida óptima tendrán considerando sus aspectos estructurales y funcionales serán el tramo intermedio y final del interceptor río Nuevo, exceptuando la situación del alivio hacia el canal Salitre el cual se presenta como antropobarrera desde el escenario 1. De acuerdo con el análisis funcional del sistema de alcantarillado realizado con EPA SWMM 5.0, los demás alivios del sistema tienen la capacidad hidráulica para seguir funcionando correctamente para el año 2051 y se deberá ser constante con el mantenimiento y limpieza de estas estructuras. La Estación Elevadora

Salitre puede verse afectada funcionalmente ante los aumentos de caudal previstos, por lo cual la EAAB deberá visualizar su factible ampliación y articularla en el tren de sistemas de drenaje urbano sostenible. En relación con la perspectiva temporal de los demás interceptores del sistema si no se realizan las adecuaciones hidráulicas del sistema, su funcionamiento a presión durante los cuarenta años entre el escenario 1 y el escenario 4 (i.e. años 2012 – 2051), habrá debilitado múltiples estructuras hidráulicas del sistema por lo cual pueden presentarse colapsos estructurales. Si las condiciones detonantes de la amenaza por encharcamiento no es intervenida al año 2051, el nivel de amenaza por encharcamiento dispuesto en la Figura 7-2 habrá afectado a la población y demás elementos vulnerables en múltiples ocasiones haciendo que el riesgo potencial llegue a su máximo. Por consiguiente para el año 2051 se espera contar con la implementación de los mecanismos que permitan que el riesgo público por inundación, particularmente por efectos pluviales, disminuya y se esté viviendo una renovación urbana enfocada a la optimización de la calidad de vida de su población con la implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible.

En el presente capítulo se presenta el ejercicio de validación de los resultados de la aplicación de la metodología RPIU en la subcuenca “Salitre Bombeo”, Bogotá D.C. Los registros de eventos de tipo aluvial verificados en las oficinas de aluvial y geoinformática del FOPAE entre los años 2002 - 2011 se presentan en la Figura 8-1 y con base en éstos se realiza una comparación de localización y tipo de afectación con relación al nivel de amenaza encontrado con la metodología RPIU.

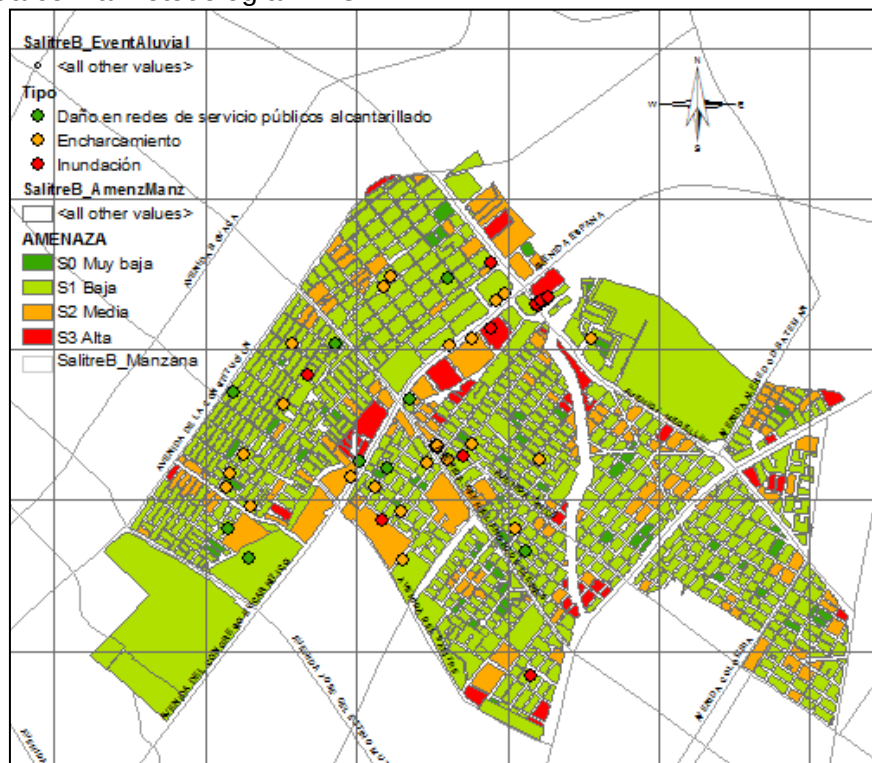
Figura 8-1. Reportes de eventos de tipo aluvial en la subcuenca “Salitre Bombeo”. FOPAE (2011).



En la Figura 8-2 se superponen con ArcMap los mencionados reportes provenientes del FOPAE con el mapa de amenaza por manzana determinada con la metodología RPIU. En la confluencia de los ríos Salitre con el río Negro y el alivio del interceptor Río Nuevo se corrobora la afectación por inundación en donde el FOPAE ha declarado el área como inundada en cinco ocasiones en los últimos diez años. La localización exacta de este punto es la Carrera 66 entre la Calle 80 y el canal Salitre, ubicado al suroccidente de la UPZ Los Andes, Localidad de Barrios Unidos.

Asimismo se corrobora la afectación en las manzanas de influencia del corredor vial de la Avenida del Congreso Eucarístico (i.e. Avenida Carrera 68), en donde se presentan los tres tipos de afectaciones coincidiendo con lo reportado por la metodología RPIU.

Figura 8-2. Superposición de reportes FOPAE con el mapa de amenaza por manzana determinada con la metodología RPIU.



Se verifican que las UPZ con manzanas frecuentemente afectadas corresponden a Las Ferias, Los Andes y Doce de Octubre. Adicionalmente se corrobora que las mayores afectaciones se tienen en las manzanas cercanas a los principales ejes viales del occidente de la subcuenca, en donde es estado de la vía es de vital importancia para el correcto funcionamiento de los sumideros y demás estructuras de alcantarillado de la subcuenca, especialmente en donde no existen canales a los cuales verter con regularidad los excesos en tiempo húmedo, como el eje del interceptor Río Nuevo en el eje vial de la Avenida Carrera 68.

9 Conclusiones y recomendaciones

A continuación se enuncian las principales conclusiones y recomendaciones a las que se ha llegado con el planteamiento de la metodología RPIU y su posterior aplicación en la subcuenca “Salitre Bombeo” y sus resultados.

9.1 Consideraciones básicas

La elaboración de una metodología de evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas RPIU, constituye un esfuerzo por abstraer y sintetizar la realidad de la problemática, y conceptualizar las relaciones entre los elementos que las componen, bajo la consideración básica de que las metodologías de análisis del riesgo deben ser entendibles, aplicables y cumplir el principio de parsimonia; es decir, sus objetivos deben ser claros, sus elementos de análisis deben ser accesibles, lo más sencillos posibles y contar con la menor cantidad de variables que describan el proceso a analizar. Igualmente, en este trabajo se tenido en cuenta el criterio de que éste tipo de metodologías debe trascender la lógica de la decisión de tipo binario en donde un valor cumple o no cumple y debe ir más allá.

Para que la elaboración de la metodología RPIU esté acorde con las necesidades actuales, la evaluación de la amenaza y de la vulnerabilidad total deben entrelazarse entre sí para establecer el nivel del riesgo potencial, en donde para el caso de la vulnerabilidad total, ésta debe obtenerse al interpretar el nivel de vulnerabilidad social, la vulnerabilidad física del territorio, de las estructuras y del sistema de alcantarillado pluvial o combinado. Al adicionar al análisis del riesgo, la resiliencia y la mitigación en la ecuación del riesgo público efectivo, ésta toma un carácter holístico, es decir se genera una integración entre los factores involucrados en el riesgo público, siendo estos como un todo los que determinan como se comportará el área urbana, los elementos expuestos y su sistema de alcantarillado en una situación de encharcamiento o inundación.

9.2 Consideraciones y criterios que sustentan la formulación de la metodología RPIU

La amenaza por inundación constituye una de las afectaciones más peligrosas para la vida humana, por tanto la identificación de los factores que constituyen la amenaza establecen una etapa importante de evaluación en el análisis del riesgo, toda vez que brinda la posibilidad de establecer la potencialidad de ocurrencia y magnitud de eventos que pueden llegar a afectar a los elementos vulnerables. En el caso particular analizado, la evaluación de las afectaciones urbanas se ha limitado a la identificación de la amenaza, especialmente la de tipo fluvial. No obstante, existen cuencas urbanas en

donde la problemática más recurrente y de mayor severidad es la amenaza por encharcamientos o inundación de tipo pluvial, por lo que su análisis fue integrado en la metodología RPIU. En este sentido, el conocimiento de las afectaciones a las que se ha visto sometida una cuenca y las normatividades que se han descrito alrededor de éstas, son el primer indicativo de las características de las posibles afectaciones futuras y por consiguiente su registro y análisis por medio de metodologías apropiadas, deben articularse con las normatividades de desarrollo de la cuenca.

Al realizar el análisis conceptual de la vulnerabilidad social para la metodología RPIU, se estableció que la primera acción que un individuo o un elemento social (i.e. una persona o grupo de personas) frente a una posible amenaza ha de ser la de “anticipar”, en donde se entiende que la anticipación puede llevar a tomar la decisión de abandonar el territorio expuesto a la amenaza o apropiarse de técnicas y herramientas que le permitan al individuo resistir los efectos de la amenaza. Si se presenta la primera opción, el individuo anticipa los efectos de una probable amenaza y abandona el lugar de posible afectación, por lo cual, al no existir exposición del individuo a la amenaza no existirá riesgo. Por otro lado, si el individuo decide permanecer en el territorio y se prepara para hacer frente y resistir la amenaza potencial, se estará hablando de técnicas de mitigación. Por lo tanto, es posible concluir que si bien la anticipación es un mecanismo para evitar o mitigar los efectos de una amenaza, no es un factor a evaluar dentro del término de vulnerabilidad social en la evaluación del riesgo público.

Desde la perspectiva del riesgo, la vulnerabilidad social es una combinación de características de una persona o grupo de estas, derivadas de sus condiciones sociales y económicas, que le permiten resistir los efectos inmediatos de una amenaza específica. Es una temática prácticamente nueva en la consecución del riesgo a nivel nacional y en la metodología RPIU se analizan sus tres aspectos más representativos: aspectos demográficos, condiciones de vida y exposición humana. Por su parte, la vulnerabilidad física tiene en cuenta las condiciones y características propias del entorno en que se localizan los elementos que pueden llegar a ser afectados por la amenaza de inundación en áreas urbanas. En la metodología RPIU la vulnerabilidad física del entorno se aborda desde tres espacios: el territorio, el uso del suelo y las edificaciones.

La vulnerabilidad operacional del sistema de alcantarillado del área de estudio involucra la evaluación de las antropobarreras, sedimentos y conexiones erradas para establecer el funcionamiento hidráulico del sistema mediante la modelación hidráulica del sistema, además de la vulnerabilidad estructural, la cual se estima mediante la determinación de la vida útil teórica remanente de los elementos del sistema, en función del tipo de elemento, el material y la edad del elemento estructural del sistema. La complementación de estos análisis, permite establecer aquellos elementos del sistema que están trabajando incorrectamente o cuya vida útil teórica ha llegado a su fin y deberán articularse en un sistema de adecuación del sistema de alcantarillado que permita extender su perspectiva de adecuada operación.

La resiliencia involucra aquellas características de las personas, organizaciones, infraestructura y ecosistemas, que les permite recuperarse y seguir adelante o en funcionamiento una vez ha sufrido el impacto de un evento amenazante. Por esta razón el riesgo efectivo no puede considerarse ni estático ni permanente, su nivel de afectación dependerá de la interacción de los eventos amenazantes y los organismos vulnerables, los cuales tendrán diferentes niveles de capacidad de recuperación dependiendo de sus condiciones antecedentes. La mitigación comprende las acciones que propenden por

reducir el riesgo existente, lo cual incluye las medidas preventivas, correctivas y de conservación que permitan restablecer las condiciones de drenaje dentro del área urbana.

El planteamiento de índices dentro de la metodología RPIU es una manera de combinar la información asociada a los indicadores de naturalezas y significados distintos, y su traducción en un solo valor. Por consiguiente cada uno de los índices empleados, deberá ser representativo de la situación real y facilitar la caracterización del factor a evaluar. En este sentido, los índices que constituyen la metodología RPIU son empleados mundialmente en múltiples áreas del conocimiento, lo que permite que la metodología RPIU sea aplicable a nivel mundial.

En la metodología RPIU, la valoración de los pesos de cada uno de los indicadores que componen los índices se obtienen mediante ponderación y sus valores deben ilustrar la importancia de cada uno con respecto a los demás en la determinación de cada índice, debiendo reflejar el conocimiento colectivo de los expertos para definir su valor. En busca de la simplicidad, se determinó que el valor del riesgo en la metodología RPIU será adimensional y sus valores estarán entre 0.1 y 10, el mínimo y el máximo riesgo, respectivamente. La escala inicia en un valor cercano a cero (0.1) debido a que sí el valor del límite inferior fuese cero (0) se asumiría que no existe riesgo y esto no es real, debido a que siempre existirá un nivel de riesgo efectivo por pequeño que este sea.

La aplicabilidad de la metodología RPIU se limita principalmente por tres factores: la escala geográfica de estudio, la disponibilidad de información con la precisión adecuada a la escala de estudio y la normalización de todos los indicadores a una misma escala.

9.3 Conclusiones acerca de la aplicación de la metodología RPIU en la subcuenca “Salitre Bombeo”

La subcuenca “Salitre Bombeo” se localiza en un sector plano de la sabana de Bogotá D.C. que actúa como amortiguador de las crecientes de los cerros orientales, en lo que se considera como el ingreso al sector medio de la cuenca del río Salitre. Esta configuración del territorio favorece la generación de encharcamientos en sectores deprimidos de la subcuenca, situación que se agrava por las configuraciones antrópicas y la falla del sistema de alcantarillado combinado en tiempo húmedo.

La presencia de un único sistema de drenaje en la subcuenca “Salitre Bombeo”, es decir un sistema de alcantarillado de tipo combinado, establece que éste debe ser capaz de conducir toda el agua sanitaria y pluvial de la subcuenca. No obstante, este tipo de sistemas reflejan una serie de problemáticas en los que hay que tratar aguas de calidades y cantidades muy diferentes, por consiguiente, debe propenderse por crear sistemas separados y dar solución a sus problemáticas que son de diferente índole.

En relación con el análisis topológico e hidráulico del sistema de alcantarillado combinado de la subcuenca “Salitre Bombeo” se establece que éste tiene dos particularidades que incrementan la vulnerabilidad funcional del sistema: el punto de concentración de la subcuenca corresponde a una estación elevadora y en tiempo húmedo diversos tramos del sistema se encuentran trabajando a presión.

Siendo el caudal residual una porción con respecto al caudal total que debe transportar la red de alcantarillado combinado del sistema “Salitre Bombeo”, en términos generales, la capacidad del sistema de alcantarillado troncal es apropiada para transportar los caudales residuales en tiempo seco. No obstante, en tiempo húmedo, se presentan fallas funcionales que se ven representadas en saturaciones del sistema incluso con lluvias de periodo de retorno de 3 años y antropobarreras que afectan su funcionamiento, trasladando la problemática a las vías de la subcuenca mediante el reflujo a través de los pozos de los interceptores. Con relación con la falla estructural, existen tramos del sistema en donde su construcción se realizó en el año 1933 en mampostería y gres, por lo cual su vida útil teórica ha sido superada hace décadas. Los tramos más afectados por la falla funcional y estructural del sistema corresponden a los Interceptores Salitre Izquierdo y Salitre Bombeo, cuyos tramos y pozos más críticos se presentaron en el Capítulo 7.

Mediante el análisis hidráulico del sistema y las visitas de campo, se estableció que las estructuras de alivio de los interceptores del sistema combinado “Salitre Bombeo” a los canales del río Salitre y del río Negro presentan fallas funcionales, al presentarse acumulación de sedimentos y residuos sólidos. Esta situación es crítica en la entrega del alivio del interceptor río Nuevo hacia el Canal Salitre, en donde, por la baja pendiente de los canales la EAAB realizó en 2011 una adecuación hidráulica del canal Salitre para transportar caudales en tiempo seco. La pendiente del canal de entrega del alivio al canal Salitre ahora funciona en sentido contrario, permitiendo que entre caudal al interceptor por medio del alivio aún en tiempo seco y se acumulen residuos sólidos que obstruyen el alivio y su canal de entrega. Asimismo, en las visitas de campo realizadas a la subcuenca “Salitre Bombeo”, se observó que la entrada del agua de escorrentía al sistema de alcantarillado por medio de los sumideros ubicados en las vías se ve limitada por la acumulación de residuos sólidos y las intervenciones en la capa de rodadura de las vías, al presentarse obstrucciones en los sumideros con residuos del material de construcción. Esta última situación se observó principalmente en el eje de la Avenida del Congreso Eucarístico (Av. Carrera 68) entre Calles 68 y 80, sector del barrio Metrópolis, en las intervenciones en el sentido sur-norte de la vía en el primer semestre del año 2012. Asimismo ocurren obstrucciones con residuos de materiales de construcción de la adecuación hidráulica en el canal Salitre, a la altura de la Avenida Carrera 68, en la intersección con el Canal Río Negro.

De acuerdo con lo analizado en la subcuenca “Salitre Bombeo” es posible establecer que el encharcamiento es el tipo de inundación más frecuente en la subcuenca de estudio y que sus efectos son los más recurrentes en la generación del riesgo por inundación en la subcuenca. Por otra parte, los desbordes pueden considerarse mucho menos frecuentes. De acuerdo con el análisis de inundación fluvial del POT 2000, los canales de los ríos Salitre y Río Negro no generaran desbordes para periodos de retorno de hasta 100 años, que es el máximo periodo de retorno analizado. En el anexo D se encuentran los mapas de amenaza pluvial para la subcuenca “Salitre Bombeo” y fluvial para la ciudad de Bogotá D.C. del POT 2000.

Se establece que los sectores de la subcuenca “Salitre Bombeo” en donde se presenta amenaza alta por encharcamiento son:

- El corredor vial de la Avenida Carrera 68, cuyo lento drenaje, sumideros obstruidos, afectaciones en la carpeta asfáltica y cierres viales, hacen que en tiempo húmedo sea una vía de tránsito lento y alta congestión vehicular.

- El área posterior al centro comercial Metrópolis, la cual se caracteriza por su topografía baja y plana. Asimismo, los pozos de este sector presentan refluo hacia la vía por efectos del incorrecto funcionamiento del alivio del interceptor río Nuevo hacia el Canal Salitre. Se presenta proliferación de vectores peligrosos para la salud en el canal de entrega del mencionado alivio.
- El área circundante a la Estación Elevadora Salitre, la cual se encuentra en un sector particularmente bajo en donde llegan la totalidad de interceptores de la subcuenca y cuyas aguas son elevadas al canal Salitre. Es un punto en donde se encuentra la confluencia de dos canales a cielo abierto, el río Salitre y el río Negro, los cuales conducen aguas combinadas durante todo el año.
- El sector cercano a la intersección de la Avenida NQS (i.e. Carrera 30) con el canal Salitre en su costado occidental, en donde se presentan un área particularmente baja y cuyos alivios conectados al canal Salitre se presentan afectados por antropobarreras.

Con respecto al análisis de la vulnerabilidad social de la subcuenca “Salitre Bombeo”, la manzana más vulnerable corresponde a la de código DANE 00520606. No obstante, su uso es residencial con actividad económica y su densidad poblacional es la más alta de la subcuenca (11167 Habitantes/hectárea), su estratificación catastral es cero (0). En este caso particular se puede concluir que una de las bondades de la aplicación de la metodología RPIU consiste en el análisis de información de diversas entidades, por lo que es posible encontrar casos como este, en donde se presentan situaciones de residencia en hacinamiento, en un área que debe ser destinada para el uso público.

De acuerdo con el POT 2000, para el año 1999 en la subcuenca “Salitre Bombeo” la manzana de código DANE 00510105, consistía en un lote disponible para urbanizar. En la aplicación de los escenarios de análisis se estimó que esta manzana fue urbanizada con el pasar de los años, lo que incrementó la densidad de poblacional del sector. En las demás manzanas de la subcuenca también se presentó, por lo general, un aumento en la densificación, en donde la tendencia del desarrollo urbanístico no depende de las áreas de la ciudad que estuvieran completamente libres, en cambio se propende por construir edificaciones multifamiliares en reemplazo de las viviendas unifamiliares. Esta situación fue representada en los escenarios de análisis aplicados a la subcuenca “Salitre Bombeo”, en donde se observó que una mayor densidad de población para la misma configuración de redes de alcantarillado, incrementa el riesgo por inundación y encharcamiento. Por consiguiente, se concluye que los desarrollos urbanísticos deben ir de la mano con las adecuaciones de los sistemas de servicios públicos, en este caso particular del sistema de alcantarillado pluvial y combinado, para evitar la saturación de las redes y su falla funcional.

Se concluye que mediante la aplicación de la metodología RPIU en la subcuenca “Salitre Bombeo”, los grupos más afectados por el riesgo efectivo debido a los encharcamientos o inundaciones son aquellos que habitan las zonas más densamente pobladas, expuestas a niveles altos de concentración de la escorrentía y áreas cercanas a canales, en su mayoría manzanas con viviendas de estrato socioeconómico 2 y 3, en donde la adecuación del terreno ha sido realizada en un alto porcentaje por los mismos

pobladores en el momento de construir su vivienda y con el posterior cubrimiento de las redes de servicios públicos.

En relación con la perspectiva temporal de operación del sistema de alcantarillado troncal combinado de la subcuenca Salitre Bombeo, determinada a partir de la vida útil remanente y de la capacidad de operación del elemento de análisis, se establece que los elementos de menor perspectiva temporal de operación se localizan en los interceptores Salitre Izquierdo y Salitre Bombeo, en donde los tramos construidos en el año 1933 en mampostería y gres, tienen una vida residual nula a 2012 dentro del sistema de alcantarillado combinado, por lo que su falla funcional se presenta con frecuencia y su falla estructural es inminente. Por otra parte, la mayor perspectiva de operación se presenta en el interceptor Río Nuevo, entre el pozo CMP58604 y hasta la entrega del interceptor Salitre Bombeo en el alivio CEA164 al Canal Salitre, en donde el sistema opera a flujo libre en un box culvert de dos celdas. No obstante este tramo tiene una buena capacidad hidráulica y no representa falla funcional, su alivio de entrega al canal Salitre, localizado en la Carrera 66 entre la Calle 80 y el canal Salitre, presenta problemas operacionales, descritos previamente.

El riesgo efectivo no puede considerarse ni estático ni permanente, su nivel de afectación dependerá de la interacción de los eventos amenazantes y los organismos vulnerables, los cuales tendrán diferentes niveles de capacidad de recuperación.

Para diversos escenarios implementados, los encharcamientos producidos por la insuficiencia hidráulica y la falla estructural del sistema de alcantarillado, establecen niveles de riesgo mayores en áreas en donde la vulnerabilidad social y física es alta.

De acuerdo con lo analizado en la subcuenca “Salitre Bombeo” es posible establecer que el encharcamiento es el tipo de inundación más frecuente (desde TR 3). Los desbordes pueden considerarse mucho menos frecuentes (más de TR 100).

La herramienta RPIU permite determinar qué acciones son verdaderamente impactantes para la reducción del riesgo. Con los resultados de la implementación de la metodología con los escenarios planteados fue posible observar que:

La red troncal de la subcuenca “Salitre Bombeo” presenta falla funcional en aproximadamente 68% de las redes, con lluvias de periodo de retorno de 3 años. Al incrementar la magnitud de la precipitación de acuerdo con el aumento en el periodo de retorno igual al horizonte temporal de análisis del escenario, se observó que se incrementaban los tramos de red con falla funcional y que la salida de caudal a través de los pozos es más notoria en el mapa de amenaza, incrementando el nivel de peligrosidad por encharcamientos en la subcuenca. Por lo cual, las intervenciones que se realicen sobre la disminución de las fallas funcionales, y por consiguiente la amenaza por encharcamiento, repercutirá de manera importante sobre la reducción del riesgo.

De acuerdo con la dinámica poblacional de la subcuenca “Salitre Bombeo”, la cual es creciente hasta el año 2051, su efecto se presenta en el índice demográfico de la

vulnerabilidad social y en los aportes de caudales residuales al sistema de alcantarillado combinado. En primer lugar, el índice demográfico incrementa su valor, alcanzando un aumento de hasta 34% en la población total de las manzanas localizadas en la UPZ Doce de Octubre, en donde el grupo etario de mayor crecimiento es el de adultos mayores (60 años o más), el cual crece en el año 2051 un 74% con respecto a lo reportado para el año 2005. El grupo etario de los menores de edad (0 a 18 años) tiende a decrecer presentándose en el año 2051, 77% menos niños y jóvenes en relación con lo reportado en 2005. Por consiguiente, es posible concluir que “Salitre Bombeo” es una subcuenca que en escenarios futuros presentará una mayor población, particularmente de adultos y adultos mayores, lo que sugiere el desarrollo de estudios de vulnerabilidad social en relación con el riesgo por inundación en especial para este último grupo etario. En segundo lugar, los aportes residuales crecen al incrementarse la población. Como el alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo” es de tipo combinado, los caudales que ingresan al sistema son porcentualmente menores con respecto a los caudales pluviales (alrededor del 20% en promedio, hasta casos como en la UGA 250 en donde el aporte residual corresponde al 56% de los aportes pluviales, es decir una tercera parte de lo que transporta el interceptor en tiempo húmedo corresponde a aguas residuales). En este sentido es posible concluir que las acciones que se tomen para evitar la disposición inmediata y masiva de estos caudales, especialmente en tiempo húmedo, pueden minimizar las afectaciones por encharcamientos en razón del caudal pico que llega a las redes y cuerpos receptores.

En la implementación de la metodología RPIU con escenarios de análisis se observó que, a futuro el nivel riesgo efectivo se incrementa siendo relevante en las 10 peores manzanas. Por otra parte, se redujo el riesgo en las manzanas sobre las cuales se desarrollaron SUDS; como en el caso de los parques y los pondajes. Esta situación revela la importancia de la intervención directa de reducción del riesgo en aquellas áreas con mayor riesgo potencial.

La red de alcantarillado combinado de la subcuenca Salitre Bombeo presenta amplias fallas de tipo principalmente funcional, que se refleja en la cantidad y severidad de los encharcamientos.

9.4 Recomendaciones

Se recomienda que la metodología RPIU se implemente a nivel de cuenca, procurando analizar la unidad hidrográfica como un todo y emplear la información más precisa disponible. Para la completa aplicación de la metodología se requiere información base de tipo geográfica, hidrológica, hidráulica, topográfica, geomorfológica, catastral, demográfica y social, la cual deberá ser permitirá implementar la metodología RPIU y determinar acertadamente el riesgo público por inundación en el área urbana.

Si es posible la adquisición de información a escalas homogéneas y de calidad, la precisión de los resultados estará en función de la normalización de los indicadores empleados, por consiguiente, es recomendable que la normalización y asignación de pesos sean realizadas por las personas más idóneas en el tema según la institución que

espere emplear el RPIU como herramienta de apoyo en lo referente a la evaluación del riesgo público por inundación en áreas urbanas. Para facilitar su uso, la información a emplear en la aplicación de la metodología RPIU se recomienda sea recopilada y posteriormente organizada y esquematizada empleando sistemas de información geográfica, de esta forma se facilita la visualización de sus características, su rápida consulta y edición. Asimismo, se recomienda incrementar el nivel de confiabilidad de las fuentes actuales de información mediante un mejor soporte informático articulado de las entidades que evalúan y gestionan el riesgo, para los sistemas de monitoreo, planeación estratégica, diseño, manejo de la construcción, operación, y mantenimiento de los sistemas de agua urbana y rural introduciendo un sistema informático integrado en base SIG.

Si se desea implementar la metodología RPIU en áreas en donde la amenaza se presenta en forma de aludes torrenciales, se recomienda realizar énfasis en la modelación hidráulica e hidrodinámica debido a que el análisis de la amenaza tendrá características más complejas, las cuales no eran relevantes dentro del presente análisis.

Es importante recordar que los modelos hidrodinámicos, como Iber, requieren una alta precisión con relación a los datos topográficos, debido que la generación de la malla del proceso depende en gran medida de esta información y por consiguiente la veracidad de los resultados. Se recomienda que para este tipo de aplicaciones se realicen procesos de levantamiento, procesamiento y depuración de la información topográfica para generar los modelos digitales del terreno en función de los alcances del estudio. Adicionalmente, se recomienda que si en el área urbanizada a implementar la metodología RPIU no se tiene en cuenta la tipología vial en la vulnerabilidad física del área de estudio, este se incluya como un indicador considerando que las vías de mayor importancia se espera sigan operando, especialmente cuando ocurre una situación de emergencia.

Se recomienda realizar a futuro complementaciones a la presente metodología, para evaluar el riesgo público por inundación predominantemente producida por aguas sanitarias, enfocándose en el análisis de la proliferación de vectores amenazantes debido a la exposición a este tipo de aguas, en enfermedades del ser humano y otros organismos, en el deterioro físico y estructural, y en el impacto ambiental de los ecosistemas.

9.5 Recomendaciones acerca de los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología RPIU

Se recomienda para las aplicaciones futuras de la metodología RPIU, realizar una o más visitas de campo a la subcuenca de estudio en diferentes etapas de la implementación, las cuales permitan establecer las particularidades de la subcuenca e identificar las problemáticas que se presentan.

Los resultados de la implementación de la metodología RPIU en la subcuenca “Salitre Bombeo”, dependen en gran medida de la calidad y cantidad de la información disponible en las entidades consultadas, entre ellas la EAAB, DANE, Planeación Distrital, entre otras. Por consiguiente, se recomienda emplear para la aplicación de la metodología la información más actualizada. Se recomienda a las entidades relacionadas con la gestión y prevención del riesgo generar un sistema de información conjunta que permita que el

reporte de parámetros de interés investigativo sea más accesible, en aras de permitir el desarrollo de conocimiento mundial. Asimismo, para la validación de las afectaciones encontradas en la subcuenca “Salitre Bombeo” con la metodología RPIU y aquellas verificadas por el FOPAE, la metodología requiere el tipo de falla y que sean verificados en campo, para así poder establecer la frecuencia y tipo de la falla.

Se recomienda que para el análisis de la densidad poblacional y sus efectos sobre los servicios públicos de la ciudad en escenarios futuros de evaluación, se genere un sistema de actualización predial disponible en donde se especifique el nuevo estado de densificación en diferentes niveles de análisis (i.e. predio, manzana, barrio, etc.) para la ciudad de Bogotá D.C.

Como resultado del análisis del riesgo potencial de inundación en la subcuenca “Salitre Bombeo” se propone la intervención de los 10 tramos de tubería y pozos con menor perspectiva temporal de operatividad en el sistema de alcantarillado troncal de la subcuenca “Salitre Bombeo”; se recomienda sean incluidos en los planes de intervención de la EAAB, previa verificación de su estado en campo.

Puesto que los modelos hidráulicos utilizados para el análisis del sistema de alcantarillado no permiten tomar en consideración todos los factores involucrados en el proceso de drenaje de la subcuenca “Salitre Bombeo” (i.e. comportamiento de los sedimentos, obstrucciones por elementos extraños en el sistema que son detectados y removidos mediante sondeos, entre otros), resulta útil complementar los resultados que éstos producen con la evaluación de la situación actual mediante observaciones directas de las redes y consultas a la comunidad, para organizar la agenda de atención a las fallas funcionales del sistema por parte de la EAAB. No obstante, se debe tener en cuenta que en algunos tramos de la red menor, en donde las actividades humanas generan la entrada de sedimentos y grasas en el sistema de alcantarillado, se presenta una disminución en la capacidad de las tuberías de los sistemas locales, provocando fallas funcionales que se transportan hacia la red troncal, por lo cual se recomienda a la EAAB realizar un monitoreo constante de este tipo de establecimientos en busca de factibles fallas en sus trampas de grasas.

Los sistemas de alcantarillado de la subcuenca “Salitre Bombeo” deberán ser adaptados con relación al nuevo ordenamiento territorial de la ciudad, para lo cual se deberán desarrollar estrategias que permitan el drenaje controlado de las aguas separadas hacia sus puntos de tratamiento y/o entrega directa. En este sentido es importante garantizar que las acciones de ampliación y adecuación del sistema combinado hacia uno separado sean articulados en un Tren de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible que permitan que el sistema sea sostenible y armónico con los requerimientos hidráulicos y urbanísticos de una ciudad capital, evitando las soluciones al final del tubo las cuales ha demostrado ser poco efectivas.

A. Anexo: Glosario

Definiciones básicas de la temática del riesgo público

La gestión del riesgo requiere de la participación de múltiples sectores de la comunidad, por tanto es necesario clarificar, definir y difundir los conceptos involucrados, buscando el común entendimiento y buen uso de la terminología del riesgo.

Mediante el Decreto 423 del 2006, la ciudad de Bogotá adoptó el Plan Distrital para la Prevención y Atención de Emergencias, el cual tiene una vigencia de 10 años. Este documento se fundamenta en las definiciones básicas de gestión del riesgo enunciadas en su artículo 3, por lo cual se adoptarán estas definiciones para el desarrollo de la presente investigación.

- **Riesgo Público:**

El daño potencial que, sobre la población y sus bienes, la infraestructura, el ambiente y la economía pública y privada, pueda causarse por la ocurrencia de amenazas de origen natural, socio-natural o antrópico no intencional, que se extiende más allá de los espacios privados o actividades particulares de las personas y organizaciones y que por su magnitud, velocidad y contingencia hace necesario un proceso de gestión que involucre al Estado y a la sociedad.

Dentro del presente Plan, el término "Riesgo" hace referencia exclusiva al riesgo público en los términos ya señalados.

- **Amenaza:**

Condición latente derivada de la posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural, socio-natural o antrópico no intencional, que puede causar daño a la población y sus bienes, la infraestructura, el ambiente y la economía pública y privada. Es un factor de riesgo externo.

- **Vulnerabilidad:**

Característica propia de un elemento o grupo de elementos expuestos a una amenaza, relacionada con su incapacidad física, económica, política o social de anticipar, resistir y recuperarse del daño sufrido cuando opera dicha amenaza. Es un factor de riesgo interno.

- **Daño o Desastre:**

Es la materialización del riesgo en el tiempo y en el espacio. Llamamos desastre a las situaciones de grandes pérdidas humanas, materiales o ambientales, causadas por fenómenos naturales o antrópicos, los cuales no pueden ser afrontados utilizando exclusivamente los recursos de la comunidad o de la sociedad afectada, y que por tanto requieren de asistencia o apoyo externos.

- **Prevención:**

Políticas y acciones que buscan evitar la generación de nuevos riesgos. Está asociada a la gestión prospectiva del riesgo.

- **Mitigación:**

Políticas y acciones tendientes a reducir el riesgo existente. Está asociada a la gestión correctiva del riesgo.

- **Atención de emergencias:**

Medidas y acciones de respuesta a la ocurrencia de un evento tendientes a auxiliar a las víctimas, reducir el daño derivado del mismo y facilitar la recuperación, mediante la acción coordinada de distintas entidades públicas, el sector privado y la comunidad.

- **Recuperación:**

Proceso de recuperación de las áreas y/o funciones afectadas por una emergencia, calamidad o desastre para el restablecimiento de condiciones socialmente aceptables y sostenibles de vida de la población, la reducción de las vulnerabilidades existentes antes de la emergencia y la intervención de procesos territoriales o sectoriales generadores de nuevos riesgos.

- **Resiliencia:**

Capacidad de las personas, las organizaciones, la infraestructura y los ecosistemas de asimilar un impacto negativo o de recuperar su funcionalidad a continuación de una emergencia, desastre o calamidad.

- **Gestión del Riesgo:**

Es un proceso social complejo que tiene como objetivo la reducción o la previsión y control permanente del riesgo en la sociedad, en consonancia con, e integrada al logro de pautas de desarrollo humano, económico, ambiental y territorial sostenibles.

- **Escenario de gestión:**

Es el nivel de análisis e intervención del riesgo que corresponde a un espacio físico de la ciudad caracterizado por:

- ✓ Procesos territoriales o económicos similares de generación de riesgo.

- ✓ Una red de actores sociales con niveles similares de desarrollo, relacionados con procesos comunes de ocupación y transformación del territorio o con una cadena de producción e intercambio de bienes o servicios.
- ✓ Similitud en el tipo, naturaleza y expresión de las amenazas naturales, socio-naturales o antrópicas.

- **Proceso de Generación de Riesgo:**

Son cadenas de acciones dentro de los procesos generales de la ocupación y transformación del territorio, o de la producción y distribución de bienes y servicios, que por su localización, por las características de los medios empleados o por su forma de operar, incrementan las amenazas o la vulnerabilidad. Tales procesos relacionan variables biofísicas, sociales, económicas y culturales que deben ser tenidas en cuenta en la gestión de cada escenario.

- **Programa:**

Es el conjunto de líneas de acción, proyectos y metas que se deben adelantar en cada escenario de gestión para la consecución de los objetivos del Plan.

- **Instrumento:**

Cada uno de los métodos o herramientas técnicas que se aplican a la gestión del riesgo, procedentes de distintas disciplinas y que inciden en los diferentes frentes de un escenario para modificar las causas o los efectos del riesgo.

Definiciones básicas relacionadas con los sistemas de alcantarillado

Las siguientes definiciones relacionan al lector con la terminología empleada en el sistema de alcantarillado pluvial, de acuerdo con lo establecido por el RAS (2000).

- **Aguas lluvias:**

Aguas provenientes de la precipitación pluvial.

- **Aguas residuales:**

Desechos líquidos provenientes de residencias, edificios, instituciones, fábricas o industrias.

- **Aguas residuales domésticas:**

Desechos líquidos provenientes de la actividad doméstica en residencias, edificios e instituciones.

- **Aguas residuales industriales:**

Desechos líquidos provenientes de las actividades industriales.

- **Aguas de infiltración:**

Agua proveniente del subsuelo, indeseable para el sistema separado y que penetra en el alcantarillado.

- **Alcantarillado:**

Conjunto de obras para la recolección, conducción y disposición final de las aguas residuales o de las aguas lluvias.

- **Alcantarillado de aguas combinadas:**

Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte, tanto de las aguas residuales como de las aguas lluvias.

- **Alcantarillado de aguas lluvias:**

Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte de aguas lluvias.

- **Alcantarillado de aguas residuales:**

Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte de las aguas residuales domésticas y/o industriales.

- **Alcantarillado separado:**

Sistema constituido por un alcantarillado de aguas residuales y otro de aguas lluvias que recolectan en forma independiente en un mismo sector.

- **Aliviadero:**

Estructura diseñada en colectores combinados, con el propósito de separar los caudales que exceden la capacidad del sistema y conducirlos a un sistema de drenaje de agua lluvia.

- **Área tributaria:**

Superficie que drena hacia un tramo o punto determinado.

- **Autoridad municipal ambiental (AMA):**

Entidad municipal que tiene a su cargo el manejo y ordenamiento ambiental.

- **Autoridad regional ambiental (ARA):**

Entidad regional que tiene a su cargo el manejo y ordenamiento ambiental.

- **Caja de inspección domiciliaria:**

Cámara localizada en el límite de la red pública de alcantarillado y la privada, que recoge las aguas residuales, lluvias o combinadas provenientes de un inmueble.

- **Cámara de caída:**

Estructura utilizada para dar continuidad al flujo cuando una tubería llega a una altura considerable respecto de la tubería de salida.

- **Caja de paso:**

Cámara sin acceso, localizada en puntos singulares por necesidad constructiva.

- **Canal:**

Cauce artificial, revestido o no, que se construye para conducir las aguas lluvias hasta su entrega final en un cauce natural.

- **Canalizar:**

Acción y efecto de construir canales para regular un cauce o corriente de un río o arroyo. Cañuela Parte interior inferior de una estructura de conexión o pozo de inspección, cuya forma orienta el flujo.

- **Caracterización de las aguas residuales:**

Determinación de la cantidad y características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.

- **Caudal de saturación:**

Caudal que corresponde a las condiciones máximas de desarrollo.

- **Coeficiente de escorrentía:**

Relación que existe entre la escorrentía y la cantidad de agua lluvia que cae en una determinada área.

- **Coeficiente de retorno:**

Relación que existe entre el caudal medio de aguas residuales y el caudal medio de agua que consume la población.

- **Coeficiente de rugosidad:**

Parámetro que representa el efecto friccional del contorno del conducto sobre el flujo y en general depende del tipo de material del conducto.

- **Colector principal ó matriz:**

Conducto cerrado circular, semicircular, rectangular, entre otros, sin conexiones domiciliarias directas que recibe los caudales de los tramos secundarios, siguiendo líneas directas de evacuación de un determinado sector.

- **Conexión domiciliar:**

Tubería que transporta las aguas residuales y/o las aguas lluvias desde la caja domiciliar hasta un colector secundario. Generalmente son de 150 mm de diámetro para vivienda unifamiliar.

- **Conexiones erradas:**

Contribución adicional de caudal debido al aporte de aguas pluviales en la red de aguas sanitarias y viceversa.

- **Consumo:**

Volumen de agua potable recibido por el usuario en un periodo determinado.

- **Cota de batea:**

Nivel del punto más bajo de la sección transversal interna de una tubería o colector.

- **Cota de clave:**

Nivel del punto más alto de la sección transversal externa de una tubería o colector.

- **Cuneta:**

Canal de sección triangular ubicado entre el sardinel y la calzada de una calle, destinado a conducir las aguas lluvias hacia los sumideros.

- **Cuerpo receptor:**

Cualquier masa de agua natural o de suelo que recibe la descarga del afluente final.

- **Densidad de población:**

Número de personas que habitan dentro de un área bruta o neta determinada.

- **Diámetro:**

Diámetro interno real de conductos circulares.

- **Dotación:**

Cantidad de agua promedio diaria por habitante que suministra el sistema de acueducto, expresada en litros por habitante por día.

- **Emisario final:**

Colectores cerrados que llevan parte o la totalidad de las aguas lluvias, sanitarias o combinadas de una localidad hasta el sitio de vertimiento o a las plantas de tratamiento de aguas residuales. En caso de aguas lluvias pueden ser colectores a cielo abierto.

- **Escorrentía:**

Volumen que llega a la corriente poco después de comenzada la lluvia.

- **Estructura de conexión o estructura-pozo:**

Estructura construida para la unión de uno o más colectores, con el fin de permitir cambios de alineamiento horizontal y vertical en el sistema de alcantarillado, entre otros propósitos.

- **Estructuras de disipación de energía:**

Estructuras construidas para disipar la energía del flujo. Estructura de separación de caudales (Ver aliviadero)

- **Estructuras de entrega:**

Estructuras utilizadas para evitar daños e inestabilidad en el cuerpo de agua receptor de aguas lluvias o residuales.

- **Estación de bombeo de aguas residuales:**

Componente de un sistema de alcantarillado sanitario o combinado utilizado para evacuar por bombeo las aguas residuales de las zonas bajas de una población. Lo anterior puede también lograrse con estaciones elevadoras de aguas residuales. Una definición similar es aplicable a estaciones de bombeo de aguas lluvias.

- **Frecuencia:**

En hidrología, número de veces que en promedio se presenta un evento con una determinada magnitud, durante un periodo definido.

- **Hidrograma:**

Gráfica que representa la variación del caudal con el tiempo en un sitio determinado, que describe usualmente la respuesta hidrológica de un área de drenaje a un evento de precipitación.

- **Intensidad de precipitación:**

Cantidad de agua lluvia caída sobre una superficie durante un tiempo determinado.

- **Instalación interna:**

Conjunto de tuberías y accesorios que recogen y conducen las aguas residuales y/o lluvias de las edificaciones hasta la caja de inspección domiciliar.

- **Interceptor:**

Conducto cerrado que recibe las afluencias de los colectores principales, y generalmente se construye paralelamente a quebradas o ríos, con el fin de evitar el vertimiento de las aguas residuales a los mismos.

- **Periodo de retorno:**

Número de años que en promedio la magnitud de un evento extremo es igualada o excedida.

- **Plan maestro de alcantarillado:**

Plan de ordenamiento del sistema de alcantarillado de una localidad para un horizonte de planeamiento dado.

- **Población servida:**

Número de habitantes que son servidos por un sistema de recolección y evacuación de aguas residuales.

- **Población flotante:**

Número de habitantes que frecuenta en determinadas épocas el área comprendida por el proyecto, que es significativa para el dimensionamiento de un proyecto de recolección y evacuación de aguas residuales.

- **Pozo de succión:**

Tanque o estructura dentro del cual las aguas residuales son extraídas por bombeo.

- **Pozo o cámara de inspección:**

Estructura de ladrillo o concreto, de forma usualmente cilíndrica, que remata generalmente en su parte superior en forma tronco-cónica, y con tapa removible para permitir la ventilación, el acceso y el mantenimiento de los colectores.

- **Precipitación:**

Cantidad de agua lluvia caída en una superficie durante un tiempo determinado.

- **Profundidad del colector:**

Diferencia de nivel entre la superficie del terreno o la rasante de la calle y la cota clave del colector.

- **Red local de alcantarillado:**

Conjunto de tuberías y canales que conforman el sistema de evacuación de las aguas residuales, pluviales o combinadas de una comunidad, y al cual desembocan las acometidas del alcantarillado de los inmuebles.

- **Red pública de alcantarillado:**

Conjunto de colectores domiciliarios y matrices que conforman el sistema de alcantarillado.

- **Red secundaria de alcantarillado:**

Conjunto de colectores que reciben contribuciones de aguas domiciliarias en cualquier punto a lo largo de su longitud.

- **Sifón invertido:**

Estructura compuesta por una o más tuberías que funcionan a presión. Se utilizan cuando es necesario pasar las tuberías por debajo de obstáculos inevitables.

- **Sumidero:**

Estructura diseñada y construida para cumplir con el propósito de captar las aguas de escorrentía que corren por las cunetas de las calzadas de las vías para entregarlas a las estructuras de conexión o pozos de inspección de los alcantarillados combinados o de lluvias.

- **Tiempo de concentración:**

Tiempo de recorrido de la escorrentía superficial desde el punto más alejado de la cuenca de drenaje hasta el punto de salida considerado. En alcantarillados es la suma del tiempo de entrada y de recorrido.

- **Tramo:**

Colector comprendido entre dos estructuras de conexión.

- **Tramos iniciales:**

Tramos de colectores domiciliarios que dan comienzo al sistema de alcantarillado.

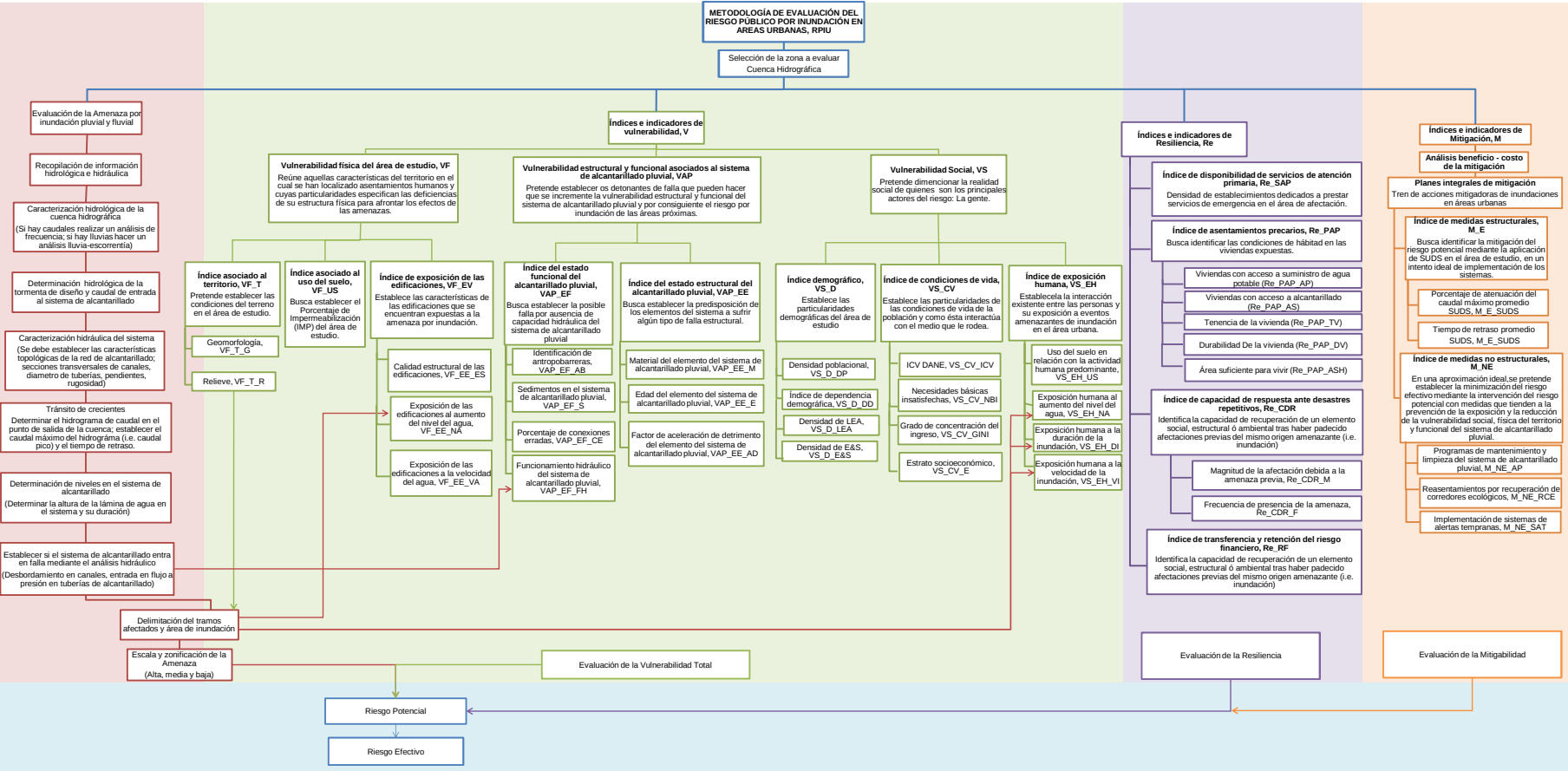
- **Tubo ó tubería:**

Conducto prefabricado, o construido en sitio, de concreto, concreto reforzado, plástico, poliuretano de alta densidad, asbesto-cemento, hierro fundido, gres vitrificado, PVC, plástico con refuerzo de fibra de vidrio, u otro material cuya tecnología y proceso de fabricación cumplan con las normas técnicas correspondientes. Por lo general su sección es circular.

- **Volumen útil:**

Volumen del pozo de succión, comprendido entre el nivel máximo y el nivel mínimo de operación de bombeo.

B. Anexo: Mapa conceptual de la metodología RPIU



C. Anexo: Aspectos relevantes del software Iber y descripción de su implementación en la modelación hidrodinámica

De acuerdo con CEDEX el al (2010), el modulo hidrodinámico del software Iber resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cunas salinas. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo.

De acuerdo con CEDEX el al (2010), en la actualidad, los modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial y litoral, evaluación de zonas inundables, y cálculo de transporte de sedimentos y contaminantes.

Para las condiciones de contornos o fronteras hidrodinámicas en Iber, se distinguen dos tipos de contornos: abiertos y cerrados. Los contornos cerrados, también llamados contornos de tipo pared, son impermeables, no permitiendo el paso del fluido a través de ellos. En los contornos abiertos se pueden imponer diferentes tipos de condiciones de contorno.

Para que las ecuaciones de aguas someras bidimensionales estén bien planteadas desde el punto de vista matemático, el número de condiciones a imponer en los contornos abiertos depende de si se trata de un contorno de entrada o de salida de flujo, así como del tipo de régimen en el contorno (rápido/lento). En un contorno de entrada es necesario imponer 3 condiciones de contorno si el régimen es supercrítico (una para cada una de las tres ecuaciones de St.Venant), mientras que si se produce régimen subcrítico es suficiente con imponer 2 condiciones. En un contorno de salida es suficiente con imponer una única condición si el régimen es subcrítico, mientras que no es necesario imponer ninguna condición si el régimen es supercrítico. Si el usuario impone

menos condiciones de las necesarias desde un punto de vista matemático las ecuaciones estarán indeterminadas y no se obtendrá una solución correcta. Las condiciones concretas a imponer pueden ser la profundidad de la lámina de agua (denominada en Iber “calado”), las componentes de la velocidad, o una combinación de ambos. En Iber se consideran diferentes opciones para imponer las condiciones de frontera, las cuales se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 9-1. Condiciones de frontera implementadas en los contornos abiertos en el software Iber. CEDEX el al (2010).

Contorno	Régimen	Condiciones impuestas
Entrada	Caudal total	Subcrítico / Crítico
		Caudal total en dirección normal al contorno
	Caudal específico	Supercrítico
		Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
Salida	Caudal total	Subcrítico / Crítico
		Caudal específico en dirección normal al contorno
	Caudal específico	Supercrítico
		a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua
Salida	Subcrítico	a) Calado
		b) Cota de agua
		c) Vertedero (cota y coeficiente de descarga)
		d) Curva de gasto
	Supercrítico / Crítico	No es necesario imponer ninguna condición

Para la implementación del software Iber en la modelación hidrodinámica y en la consecución del mapa de amenaza por encharcamiento, se siguió el siguiente procedimiento:

- Se ingresó el modelo digital de elevación por medio del menú “Iber _Herramientas > RTIN”, en formato ASCII.
- A partir de la topografía importada se asignaron los componentes hidrodinámicos de condición inicial en toda la geometría con profundidad de la lámina de agua inicial (calado en Iber) de valor cero (0).

- Se ingresó por medio de modulo hidrológico el hietograma de precipitación a transitar para cada uno de los periodos de retorno, presentados en la Figura 6-13 a la Figura 6-18.
- Se ingresaron los
- Para el cálculo se generó una malla estructurada sobre superficies, con una división por línea ("Malla > Estructurada > Superficies > Asignar número de divisiones", seleccionar todas las superficies, escoger Número de divisiones =1, seleccionar todas las líneas).
- Una vez generada la malla de cálculo se ingresó el valor del coeficiente de Manning de las diferentes coberturas en la subcuenca, en donde se implementaron tres tipos de coberturas: Áreas impermeables (i.e. áreas de la subcuenca correspondiente a vías, $n=0.01$), edificaciones (i.e. áreas de la subcuenca correspondiente a los techos de las edificaciones, $n=0.02$, y áreas verdes $n=0.05$ (i.e. correspondientes a las manzanas de la subcuenca en donde se localizan áreas verdes predominantemente). Estos valores asumidos se ingresaron de forma automática por medio de un shape editado y dispuesto en formato ASCII el cual fue importado al programa Iber "Datos >Rugosidad > Asignación automática".
- Se realizó el proceso de simulación hidrodinámica el cual reporta datos cada 300 segundos (i.e. 5 minutos) para duraciones de tormenta de 10800 segundos (i.e. 3 horas).
- Una vez finalizado el cálculo, se puede acceder al post-proceso para visualizar y analizar los resultados. El cambio entre las interfaces de pre-proceso y post-proceso se realiza mediante el menú "Archivo > post proceso" y "Archivo > pre proceso", o mediante los botones correspondientes de la barra de herramientas
- Una vez generado el cálculo de la simulación hidrodinámica, el modelo Iber dispone de múltiples opciones para visualizar y analizar los resultados. Una opción para visualizar los resultados es mediante el menú "Ventana > ver resultados". La ventana que se abre permite acceder a los distintos grupos de resultados o análisis que se pueden visualizar en cada instante de tiempo, como áreas coloreadas, áreas coloreadas suavizadas, o vectores.
- Finalmente Iber permite exportar la mayoría de resultados en formato ASCII grid de Arc Info a través del menú "Iber_Herramientas > Resultados en Grid". Se debe seleccionar un resultado, introducir el valor de un instante de tiempo y un tamaño de celda. Iber creará una carpeta dentro de la carpeta del proyecto actual (carpeta Grids of results), y dentro de la misma los archivos en formato ASCII de los resultados seleccionados en el instante de tiempo más próximo al solicitado.

Bibliografía

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2000). Decreto 619 de 2000. Por el cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial para Santa Fe de Bogotá, Distrito Capital. POT 2000.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2003). Decreto 469 de 2003. Por el cual se revisa el Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2004a). Decreto 190 de 2004. Por medio del cual se compilan las disposiciones contenidas en los Decretos Distritales 619 de 2000 y 469 de 2003.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2004b). Decreto 332 de 2004. Por el cual se organiza el régimen y el sistema para la prevención y atención de emergencias en Bogotá D.C. y se dictan otras disposiciones.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2006a). Decreto 314 de 2006. Por el cual se adopta el plan distrital para la atención de emergencias para Bogotá D.C.

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2006b). Decreto 423 de 2006. Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2004-2015.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2010). Decreto 413 de 2010. Por medio del cual se modifica el Decreto 539 de la 2006 de la Secretaría Distrital de Gobierno y se dictan otras disposiciones.

Barbat, A; Pujades, L. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona. Sísmica 2004 - 6º Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Sísmica.

Barrenechea, J; Gentile, E; González S; Natenzon C. (2000). Una propuesta metodológica para el estudio de la vulnerabilidad social en el marco de la teoría social del riesgo.

Barnolas, M; Llasat, M. (2005). Aplicación de una herramienta SIG en el estudio de las inundaciones en Catalunya, 1901-2000.

Barros, J; Vallejo, L. (2007). Metodología para evaluación de la condición de corrientes urbanas. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 7, p. 75-86. Junio 2007. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín, Colombia.

BID-IDEA (2004). Eventos Máximos Considerados (EMC) y estimación de pérdidas probables para el cálculo del Índice de Déficit por Desastre (IDD) en doce países de las Américas. Programa de información e indicadores de gestión de riesgos.

BID-CEPAL. (2007). Información para la gestión de riesgo de desastres estudio de caso de cinco países – Estudio de caso Colombia.

Boudon, R; Lazarsfeld, P. (1985). Metodología de las ciencias sociales. Conceptos e índices, Vol. 1, Barcelona, Laia, pp. 59-76.

Blaikie, P; Cannon, T; Davis, I; Wisner, B. (1996). Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres. Bogotá, LA RED/ITDG.

Bó, R; Malvárez, A. (1999). Las inundaciones y la biodiversidad en humedales. Un análisis del efecto de eventos extremos sobre la fauna silvestre. Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto “*Efectos del evento de inundación de 1982 - 1983 sobre la región del Delta del Río Paraná. El caso del Departamento Victoria, Entre Ríos*”. Programa de Medio Ambiente, Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad de Buenos Aires (UBACYT), Argentina. Proyecto AM-05/94, Expte. N° 27.316/92

Buitrago, N (2011). Cuantificación y Caracterización de la Calidad de Agua de Escorrentía de Techo para el Prediseño de una Piscina de Retención en el Campus de la Universidad Nacional de Colombia. Tesis de maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Cardona, O. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. “Una crítica y una revisión necesaria para la gestión”. Artículo y ponencia para International Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice, 29 y 30 de Junio de 2001, Disaster Studies of Wageningen University and Research Centre, Wageningen, Holanda.

Cardona, O. (2005). Midiendo lo inmedible. Indicadores de Vulnerabilidad y Riesgo. Colombia.

Cardona, O. (2007). Diagnóstico de la gestión financiera del riesgo y propuesta de instrumentos financieros factibles de retención y transferencia. Colombia.

Castañeda, S; Guardado, R. (2006). Análisis de la vulnerabilidad en áreas de inundación del territorio de Sagua de Tánamo, provincia de Holguín, Cuba.

CEDEX; Grupo Flumen; GEAMA; CIMNE. (2010). Iber, Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual básico de usuario. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Grupo Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya UPC y Universitat de Barcelona UB), Grupo de

Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña UDC), Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE (Vinculado a la Universitat Politècnica de Catalunya). <http://www.iberaula.es/web/index.php>. España.

Cepeda, E. (2010). Recopilación histórica y análisis climatológico de eventos de granizada ocurridos sobre Bogotá y su relación con el cambio climático global. Tesis de maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

CIRIA. (2007). *The SUDS manual*. Ed. CIRIA, Londres. Reino Unido.

Chow, Ven Te; MAIDMENT, David; MAYS, Larry. (1994). Hidrología aplicada. Ed. McGraw-Hill. Bogotá D.C., Colombia.

Díaz Granados, M; Camacho, L. (2003). Modelación hidrológica y ambiental de una subcuenca de la ciudad de Bogotá. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión integrada de los Recursos Hídricos. Cali, Colombia.

Díaz Granados, M; Rodríguez, J; Rodríguez, M; Penagos, J; Camacho, L; Achleitner, S; Maksimovic, C; McIntyre, Neil. (2009). Towards a Paradigm Shift in Urban Drainage Management and Modelling in Developing Countries. (Hacia un cambio en el paradigma del manejo y modelación de sistemas de drenaje urbano en países en desarrollo). #30 Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

Duarte, M.P. (2009). Propuesta metodológica para la medición y análisis del fenómeno de primer lavado (first flush) en cuencas urbanas - Campus Universidad Nacional De Colombia – Sede Bogotá. Tesis de Maestría en Ingeniería- Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.

Duchese, S; Mailhot, A; Dequidt, E; Villeneuve, JP. (2000). Mathematical modeling of sewers under surcharge for real time control of combined sewer overflows. Université du Québec. UrbanWater. Canadá.

Corporación OSSO (2011). DesInventar. Sistema de inventario de efectos de desastres. (c) 1996-2011. Colombia

DANE. (2004). Metodologías de estratificación. Bogotá D.C., Colombia.

DANE. (2005). Censo General 2005. <http://www.dane.gov.co>. Bogotá D.C., Colombia.

DANE. (2007). Encuesta de Calidad de Vida. <http://www.dane.gov.co>. Bogotá D.C., Colombia.

DPAE. (2007). Informe sobre puntos críticos por problemas en cauces identificados en las principales cuencas de Bogotá. Coordinación de Gestión Territorial. Bogotá D.C., Colombia.

DPAE. (2009). Presentación del Departamento Nacional de Planeación sobre lo local como el ámbito de intervención de la Gestión del Riesgo. Bogotá D.C., Colombia.

DPAE. (2010a). Documentación de la elaboración de matrices de ola invernal en Bogotá D.C. Grupo aluvial, Dirección de prevención y atención de emergencias de Bogotá D.C., Colombia.

DPAE. (2010b). Informe sobre puntos de seguimiento por ola invernal. Coordinación de Gestión Territorial, Dirección de Prevención y Atención de Emergencias. Bogotá D.C., Colombia.

DPAE. (2011). Matrices de ola invernal. Bogotá D.C, Colombia.

Dolz, J; Gómez, M. (). Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya

EAAB. (2003). Sistema de información geográfica unificado empresarial SIGUE. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

EAAB. (2006). Plan maestro de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Documento técnico de soporte.

EAAB. (2007). Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos – PSMV.

EAAB. (2008). Metodología para calcular la cobertura de alcantarillado a partir de herramientas SIG.

EAAB. (2011a). Modelo integrado de drenaje urbano de Bogotá. Documento de la Dirección de Ingeniería Especializada.

EAAB. (2011b). SIRA, Sistema de información para la rehabilitación de redes de alcantarillado. Documento de la Dirección de Ingeniería Especializada.

EAAB & Consorcio Alcantarillado. (2011). Consultoría para adelantar estructuración e integración de modelos hidráulicos e hidrológicos sobre el estado actual del sistema troncal de alcantarillado sanitario y combinado de la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá. Contrato de Consultoría N° 2-02-25500-0841-2010.

EAAB & Cubillos, R. (2009). Consultoría para la actualización del Estudio de Proyecciones de la Demanda de Agua para la ciudad de Bogotá D.C. y Municipios Vecinos. Volumen 1, Anexo 1, Análisis de estudios de población y viviendas de la ciudad de Bogotá y municipios vecinos – Proyecciones.

EAAB & ECI. (2010). Consultoría para la Investigación, Estudios y Diseños de Ingeniería Básica para la Rehabilitación de las Redes Troncales en los Sectores de Expansión y Redensificación. Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI).

EAAB & H MV. (2003). Estudio de actualización del Plan Maestro de Alcantarillado de la cuenca del Salitre y Jaboque. Informe Productos 3, 4 y 5. ACUEDUCTO–CONTRATO 1-02-4100-158-2000

EAAB & INGEPAVI LTDA. (2011). Red troncal alcantarillado sanitario. Informe Técnico Final. Contrato 2-02-25500-0754-2010.

EAAB & INGETEC. (2005). Estudio y revisión de las curvas IDF y del análisis espacial de las tormentas (Curvas PADF) para la Sabana de Bogotá. Contrato No. 2-02-26100-607-2003.

EAAB & IRH. (1995). Estudio para la caracterización de tormentas en la sabana de Bogotá. Software Tormenta.

EAAB & UNIANDES. (2008). Modelo integrado de drenaje urbano de Bogotá. Elaborado en CityDrain plataforma Matlab Simulink.

ERN (2010). ERN – VULNERABILIDAD. Derechos de Autor y de Propiedad Intelectual reservados (C) 2010 ERN América Latina. Todos los derechos y de Propiedad Intelectual son reservados.

ERN - CAPRA (2009). Vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura. Nicaragua. Tomo I. Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales.

ERN - CAPRA (2009). Modelos de evaluación de amenazas naturales y selección. Nicaragua. Tomo I. Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales.

ERN - CAPRA (2009). Componentes principales del análisis de riesgos. Nicaragua. Tomo I. Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales.

ERN - CAPRA (2009). Informe técnico ERN-CAPRA-T1-3 Modelos de evaluación de amenazas naturales y selección. Nicaragua. Tomo I. Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales.

ERN-Manizales. (2005). Diseño de esquemas de transferencia de riesgo para la protección financiera de edificaciones públicas y privadas en Manizales en el caso de desastres naturales. Preparados para el Departamento Nacional de Planeación (DNP), la Agencia Colombiana Cooperación Internacional (ACCI) y el Banco Mundial, Bogotá.

Escuder, I.; Matheu, E. y Castillo, J. (2010). Análisis y evaluación de riesgos de inundación: estimación del impacto de medidas estructurales y no estructurales. Análisis y evaluación de riesgos de inundación. Jornada CICC PV, 15 de Octubre de 2010

Estupiñan, H. (2009). Metodología para modelar el sistema de drenaje incorporando los procesos de acumulación y lavado en una cuenca urbana. Campus Universidad Nacional de Colombia - sede Bogotá. Tesis de Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

FASECOLDA. (2011). Seguros de daños. El seguro de incendio y terremoto. Evolución y dinámica del ramo. FASECOLDA, Federación de Aseguradores Colombianos.

Figueira, J; Romero, A. (2007). Aplicación de los SIG para la gestión de datos de inundaciones históricas en Extremadura (SIGIHEX).

FOPAE. (2009). Marco metodológico para la evaluación del riesgo público en redes de servicio público de Bogotá. FOPAE, Fondo de prevención y atención de emergencias.

FOPAE. (2011). SDPAE. <http://www.sire.gov.co/portal/page/portal/sire/sdpae/>

FOPAE (UPES); HIDROTEC. (1999). Zonificación de riesgos por inundación del río Juan Amarillo.

Garzón, E. (2004). Calamidades. Ed. Gedisa, Barcelona.

Giraldo, C. (2005). Asesoría a la Gerencia de Tecnología en temas relacionados con el saneamiento del Río Bogotá y su relación con el sistema de alcantarillado. Producto 1: Estudio del funcionamiento hidráulico del sistema Salitre. EAAB.

Gómez, M; Russo, B. (2004) Metodología para el diseño de un nuevo sistema de captación en un tramo de calle en Barcelona. XXI Congreso latinoamericano de hidráulica. Sao Paulo, Estado de Sao Paulo, Brasil, Octubre 2004.

González, D. (2010). Un modelo integral para la valoración del riesgo de inundación en centros urbanos y/o suburbanos. Caso: Pueblo Viejo, Veracruz, México. Revista UAT Año 4 Número 16 Junio 2010.

González, J. (2011). Modelación integrada del sistema de drenaje -PTAR-río de la ciudad de Bogotá. Escenarios de control regional. Tesis de maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Guzmán, H. (1998). Seguimiento y análisis de variables hidrológicas para la mitigación de las inundaciones. IDEAM, Subdirección de hidrología.

ICONTEC. (2002). Compendio, tesis y otros trabajos de investigación. Quinta Actualización. Bogotá

IDEAM (2010). Los Ríos. Definiciones.

IDEAM & FOPAE. (2007). Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo

INETER & COSUDE. (2006). Inundaciones fluviales. Mapas de amenazas. Recomendaciones técnicas para su elaboración. Proyecto Met-Alarn, Ineter & Cosude.

IPCC. (2008). El cambio climático y el agua. Documento técnico VI. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, OMM, PNUMA.

Jiménez, A. (2008). Instrumentación y análisis de la variación espacial y temporal de la precipitación en la respuesta de una cuenca urbana. Caso de estudio Campus Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

La Red. (1998). Navegando entre brumas. La aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgo en América Latina.

Leopold, Luna B. (1968). Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use, U.S. Geological Survey Circular 554, 18p.

López, R. (1995). Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. 2ª. Edición. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Maksimovic, C; Braga, B. (1993). Urban drainage problems in the humid tropics. *Hydrology of Warm Humid Resions* (Proceedings of the Yokohama Symposium. July 1993). IAHS Publ.no. 216, 1993.

Maksimovic, C. (2008). Structural vs. Non-structural measures \& SUDS - SUDS from the concept to implementation. *II International engineering Seminar: Urban Hydrology and Integrated Urban Drainage Management*.

Martos, D. (2006). La administración de riesgos públicos.

Martínez, O. (2000). Aplicación del modelo HEC RAS para la elaboración de mapas de amenazas por inundación (Río Magdalena, Puerto Salgar - La Dorada). Bogotá: Tesis de Posgrado en Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.

Medina, F. (2001). Consideraciones sobre el índice de Gini para medir la concentración del ingreso. Serie 9. Estudios estadísticos y prospectivos. División de Estadística y Proyecciones Económicas. CEPAL.

Méndez, Z. (2003). Aplicación de un modelo neuronal de estimación del riesgo de inundación asociado a redes de drenaje pluvial urbano. Tesis. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Mercuri, P; Díaz, R; Fernández, N. (2007). Evaluación de fuentes de datos topográficos para la modelación hidrológica.

Moreno, M; Hernández, G. (2008). Determinación de zonas de riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales. *XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Sociedad Colombiana de Ingenieros*.

MinDesarrollo. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, RAS – 2000. Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Mondragón, A (2002). ¿Qué son los indicadores? Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). México.

Momparler, S; Andrés-Doménech, I. (2007). Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia. Revista: Equipamiento y Servicio Municipales, 2007 SEP-OCT; AÑO 24 (133)

Navarro, I; Bermúdez, N; Saldarriaga, J.G. (2011). Diseño optimizado de redes de drenaje urbano.

NYC, 2011. Evitando las descargas de grasa en el alcantarillado. Directrices para los negocios de la ciudad de Nueva York. New York City Department of Environmental Protection. Bureau of Wastewater Treatment.

Olcina, J. (2008). Prevención de riesgos: cambio climático, sequías e inundaciones.

ONU. (2009). Estrategia Internacional de Reducción de Desastres (EIRD). UNISDR Terminología sobre Reducción de Riesgo de Desastres (RRD).

OPS. (1998). Mitigación de desastres naturales en sistemas de agua potable y alcantarillado. OPS, Organización Panamericana de la Salud. <http://www.col.ops-oms.org/desastres/docs/bogota/index.htm>

OPS. (2000). Prevención y Atención de Emergencias en Bogotá, D.C. / 1998 – 2000.

PHI-LAC. (2009). Seminario internacional sobre desastres por inundación. Programa Hidrológico Internacional, PHI UNESCO Iniciativa Internacional sobre Inundaciones, IFI Coordinación Regional para Latinoamérica y el Caribe, LAC.

PREDECAN; Corporación OSSO; CAPRADE. (2009). Primera aproximación a un atlas de amenazas, exposición y riesgos relativos en los países de la subregión andina.

Raciny, I., Rodríguez, J., Díaz-Granados, M. y Pérez, J. (2008). Modelación de la calidad del agua de los ríos urbanos Salitre, Fucha y Tunjuelo. XXIII Congreso Latinoamericano de hidráulica. IAHR, Cartagena de Indias, Colombia.

Red Bogotá (2011). www.redbogota.com/endatos/0100/0110/0112-hidro/0112142.htm. Consultada el 25 de julio de 2011.

Rincón, N. (2006). Modelación integrada del sistema de alcantarillado, PTAR y río – Caso PTAR Salitre. Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. Bogotá.

Rodríguez, E; González, R; Medina, P; Pardo, Y; Santos, C. (2007). Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del Río Las Ceibas (Neiva- Huila). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.

Rodríguez, J. (2000). Indicadores demográficos y encuestas de hogares: un primer aporte. CEPAL. Programa para el mejoramiento de las encuestas y la medición de las condiciones de vida en América Latina y el Caribe. Taller 6. Indicadores sobre el desarrollo social. Buenos Aires, Argentina 15-17 de noviembre de 2000.

Rodríguez, J., Díaz-Granados, M., Montes, P. y Saavedra, J. (2008). Modelación integrada de sistemas de drenaje urbano - Caso Bogotá D.C. XXIII Congreso Latinoamericano de hidráulica. IAHR, Cartagena de Indias, Colombia.

Rodríguez, N; Saldarriaga, J. (2006). Desarrollo de una metodología para determinar cuándo rehabilitar redes de alcantarillado. Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia.

Rojas, A; González, J; Rodríguez, E; Camacho, L. (2011). Aplicación de modelos simplificados lluvia-escurrimiento en una microcuenca urbana. Caso de estudio campus Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. XIX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología y el I Foro Nacional sobre la seguridad de embalses. Bogotá D.C. Colombia, 24 y 25 de marzo 2011.

Roseen, R; Ballesteros, T; Houle, J; Avellaneda, P; Briggs, J; Fowler, G; Wildey, R. (2009). Seasonal Performance Variations for Storm-Water Management Systems in Cold Climate Conditions. Journal of Environmental Engineering, Vol. 135, No. 3, March 1, 2009. ©ASCE, ISSN 0733-9372/2009/3-128-137/\$25.00.

Saaty, T. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill Book Co., N.Y.

Salamanca, L. (2009). Estudio de resiliencia en desastres naturales en seis barrios de la ciudad de La Paz, Bolivia. Artículo consignado en la revista *La Gestión del Riesgo Urbano en América Latina: Recopilación de artículos*. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, EIRD.

Sanahuja, H. (1999). El daño y la evaluación del riesgo en América central, Una propuesta metodológica tomando como caso de estudio a Costa Rica. Tesis de Posgrado, Maestría en Geografía de la Universidad de Costa Rica. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina

SDA (2010). Observatorio Ambiental de Bogotá. Secretaria Distrital de Ambiente. Bogotá D.C., Colombia. <http://oab.ambientebogota.gov.co/>

SDP (2010). Proyecciones de población del Distrito Capital 2005 - 2015. Secretaría Distrital de Planeación. Bogotá D.C., Colombia. <http://www.sdp.gov.co/>

SDA & UMNG. (2008). Formulación del plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Salitre en el perímetro urbano del distrito capital. Informe de la fase de diagnóstico. POMCA. Secretaria Distrital de Ambiente & Universidad Militar Nueva Granada. Colombia.

SSPD. (2007). Estudio sectorial, Acueducto y alcantarillado 2002-2005. Superintendencia de Servicios Público Domiciliarios. Colombia.

SSPD. (2009). Sistema de alcantarillado en Colombia. Visión del servicio público. Superintendencia de Servicios Público Domiciliarios.

Torres, A; Méndez, Z. (2003). Estimación del riesgo en estructuras de drenaje pluvial mediante herramientas de inteligencia artificial. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., Colombia. Seminario internacional la hidroinformática en la gestión integrada de los recursos hídricos.

Tucci, C. (2007). Gestión de inundaciones urbanas.

UN-HÁBITAT (2003). Guía para el monitoreo de la Meta 11 *“Para el año 2020 haber Mejorado Sustancialmente la Vida de por lo Menos 100 Millones de Habitantes de Asentamientos Precarios”*. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. Colombia.

UNIANDES (2007). Instrumentación, monitoreo y estimación de cargas contaminantes afluentes a los Ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo y a la PTAR Salitre. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, CIIA. Colombia.

UNH (2007) Stormwater Center Annual Report. University of New Hampshire. Estados Unidos de América.

UPES & HIDROTEC (1999). Zonificación de riesgo por inundación del río Juan Amarillo. Informe final. Documento 65 – IF01 – 2. UPES: Unidad de Prevención y Atención de Emergencias, Bogotá. Colombia.

VEEDURIA DISTRITAL (2002). Vulnerabilidad social en Bogotá. Colombia.

VISIÓN MUNDIAL (2011). Proyecto de resiliencia comunitaria. http://www.resilienciacomunitaria.org/index.php?option=com_chronocontact&task=send&chronoformname=contacto&Itemid=65

Zonensein, J; Miguez, M.G; de Magalhães, L.P.C; Valentin, M.G; Mascarenhas, F.C.B. (2008). Flood Risk Index as an Urban Management Tool. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.