



Modelo Conceptual de Análisis de la Resiliencia Ingenieril y Socio-Ecológica para la Sostenibilidad de Sistemas de Drenaje Urbano

Sergio Andrés Blanco Londoño
Ing. Civil, MSc.
Código 1405626

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería - Programa de Doctorado en Ingeniería
Área de Énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Santiago de Cali, Colombia
2022

Modelo Conceptual de Análisis de la Resiliencia Ingenieril y Socio-Ecológica para la Sostenibilidad de Sistemas de Drenaje Urbano

Sergio Andrés Blanco Londoño
Ing. Civil, MSc.
Código 1405626

Tesis presentada al Programa de
Doctorado en Ingeniería - Área de Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental
como parte de los requisitos para obtener el título de:

Doctor en Ingeniería

Directores:

Prof. Alberto Galvis Castaño
Ing. Sanitario, MSc, PhD.
Instituto CINARA

Grupo de Investigación Gestión Integrada de Recursos Hídricos - GIRH

Prof. Patricia Torres Lozada
Ing. Sanitaria, MSc, PhD.

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente - EIDENAR
Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental - ECCA

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería - Programa de Doctorado en Ingeniería
Santiago de Cali, Colombia
2022

*A mis padres Mario y Ross Mary,
a mi hermana Marcela y
a mis hijos Alejandro y Andrés*

AGRADECIMIENTOS

Primero agradezco a Dios que es vida y me ha dado la oportunidad de transitar este camino.

A mi familia por el apoyo constante, especialmente a mis padres Mario y Ross Mary y a mi hermana Marcela por su constante preocupación por mi Tesis Doctoral.

También deseo agradecer a mi Director Prof. Alberto Galvis por la confianza depositada y constante orientación para la realización de esta investigación, pero sobre todo por sus palabras sinceras en los momentos precisos, por las enseñanzas de vida a través de sus consejos y por toda la paciencia.

Adicionalmente, tengo un profundo agradecimiento hacia mi Directora, la Prof. Patricia Torres por su orientación precisa, por las palabras de aliento y su constante e inagotable disposición en ayudarme.

Agradezco al Dr. Manfred Schütze por sus asesorías, amistad y por darme la oportunidad de realizar una pasantía en el instituto IFAK – Magdeburgo, Alemania.

A los jurados de mi Tesis Doctoral Dr. Diego Fernando Muriel Delgado de Johns Hopkins University y la Dra. Sandra Lorena Galarza Molina de la Pontificia Universidad Javeriana por sus útiles y valiosas observaciones y comentarios.

Gracias a mis compañeros del grupo de investigación GIRH de la Universidad del Valle, Edison Domínguez, Edwin Toledo y Julián Barahona, que me ayudaron con sus trabajos de investigación a través del Proyecto Gestión de la Resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano de COLCIENCIAS (ahora MINCIENCIAS), sin ustedes no habría sido posible.

Gracias a mis colegas y compañeros del grupo de investigación ECCA de la Universidad del Valle, Brayan Parra, Claudia Amézquita, Dayana Grisales, Eliana Jiménez, Fabiana Gaviria, Francisco Caicedo, Jhon Sandoval, Jonathan Soto, Teresita Canchala y Yelitza Zorrilla, gracias por hacer de éste, un periodo feliz.

A todo el personal del instituto IFAK de Alemania que hizo de mi pasantía una experiencia enriquecedora.

A mi amiga la Prof. Tatiana Rodríguez de la Universidad Militar Nueva Granada, por su sincero apoyo y motivación para emprender este camino.

Al Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental - PISA de la Universidad del Valle y a los profesionales maravillosos que ahí conocí por su disposición hacia los estudiantes y la ayuda en los procesos administrativos.

A ti Tatiana Mañunga, por regalarme tu amistad sincera, tus palabras de aliento y apoyo incondicional.

Y por último, pero no menos importante a la Universidad del Valle por la oportunidad de estudiar, a MINCIENCIAS por su apoyo financiero a través del proyecto de resiliencia y del Crédito-Condonable concedido para el desarrollo de mis estudios doctorales y a COLFUTURO por su acompañamiento en la parte administrativa del Crédito-Condonable de MINCIENCIAS.

Tabla de Contenido

	Pág.
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
ESTRUCTURA GENERAL DE LA TESIS.....	XII
<i>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL</i>	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
<i>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA</i>	4
2.1 GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA URBANA (GIAU).....	4
2.2 SISTEMA DE DRENAJE URBANO (SDU).....	5
2.3 SOSTENIBILIDAD.....	8
2.4 RESILIENCIA.....	9
2.4.1 Evolución del concepto de resiliencia.....	9
2.4.2 Resiliencia Ingenieril (RI)	10
2.4.3 Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	11
2.5 GESTIÓN DEL RIESGO EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO.....	12
2.5.1 Amenaza	12
2.5.2 Vulnerabilidad	13
2.5.3 Riesgo	14
2.5.4 Estrategias de mitigación	14
2.6 SISTEMA DE DRENAJE URBANO RESILIENTE (SDUR).....	15
2.7 RESILIENCIA EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO	17
2.8 BRECHAS DEL CONOCIMIENTO.....	19
<i>CAPÍTULO 3. IDENTIFICACIÓN DE FACTORES, VARIABLES E INDICADORES CLAVE DE RESILIENCIA EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO</i>	21
3.1 REVISIÓN DE LITERATURA	21
3.1.1 Aspectos conceptuales a considerar en la Resiliencia Ingenieril (RI) por cantidad.....	21
3.1.2 Aspectos conceptuales a considerar en la Resiliencia Socio-Ecológica (RSE) por cantidad ..	23
3.2 METODOLOGÍA.....	24
3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28

3.3.1 Factores clave de resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano (SDU)	28
3.3.2 Variables e indicadores clave de resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano (SDU).....	31
3.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3.....	34
<i>CAPÍTULO 4. FORMULACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO</i>	<i>36</i>
4.1 REVISIÓN DE LITERATURA	36
4.1.1 Modelos conceptuales de resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano (SDU).....	36
4.1.2 Modelo <i>Storm Water Management Model</i> (SWMM).....	40
4.1.3 Análisis de la resiliencia por cantidad en Sistemas de Drenaje Urbano (SDU).....	41
4.2 METODOLOGÍA	45
4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO 4.....	53
<i>CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL EN UN SISTEMA DE DRENAJE URBANO.....</i>	<i>55</i>
5.1 REVISIÓN DE LITERATURA	55
5.2 METODOLOGÍA	56
5.2.1 Descripción del área de estudio	57
5.2.2 Esquematización y calibración en SWMM del Sistema de Drenaje Sur (SDS) de Cali.....	61
5.2.3 Evaluación del modelo conceptual en el Sistema de Drenaje Sur (SDS) de Cali.....	62
5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
5.3.1 Evaluación de la estructura del modelo conceptual y sus relaciones.....	66
5.3.2 Evaluación de la concordancia entre las predicciones del modelo conceptual y los datos del Sistema de Drenaje Sur (SDS) de Cali	69
5.3.3 Evaluación de la sensibilidad del modelo conceptual a cambios en los indicadores.....	73
5.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5.....	77
<i>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES</i>	<i>78</i>
6.1 CONCLUSIONES FINALES.....	78
6.2 RECOMENDACIONES.....	79
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>81</i>
<i>ANEXOS. CUANTIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA INTEGRAL (IR).....</i>	<i>94</i>

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 2.1 Principales servicios ecosistémicos que brinda el SDU	8
Tabla 2.2 Tipos de amenazas que afrontan los SDU y ejemplos de amenazas y fallas.....	13
Tabla 2.3 Tipos de estrategias de mitigación del riesgo y sus ejemplos	15
Tabla 2.4 Modelos conceptuales de análisis de resiliencia aplicables en SDU	18
Tabla 3.1 Usos del suelo y TR de diseño de la función básica.....	21
Tabla 3.2 Tipos de vías y TR de diseño de la función complementaria.....	22
Tabla 3.3 Discusiones desarrolladas para mejorar la conceptualización de los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU.....	26
Tabla 3.4 Factores considerados en diferentes estudios de resiliencia en SDU	29
Tabla 3.5 Características de los factores clave de resiliencia en SDU y sus estrategias de mitigación	30
Tabla 3.6 Variables e indicadores considerados en diferentes estudios de resiliencia en SDU	31
Tabla 3.7 Factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU	33
Tabla 4.1 Características de los modelos conceptuales de resiliencia aplicables en SDU	37
Tabla 4.2 Métodos de normalización de indicadores considerados en los modelos conceptuales de RSE.	39
Tabla 4.3 Métodos de ponderación considerados en los modelos conceptuales de RSE	40
Tabla 4.4 Métodos de agregación de factores, variables e indicadores considerados en los modelos conceptuales de RSE.....	40
Tabla 4.5 Estado del SDU y valor de $D(t)$ de acuerdo con el numerador y denominador	43
Tabla 4.6 Amenazas consideradas en el modelo conceptual.....	47
Tabla 4.7 Pesos de los factores, variables e indicadores de RSE en SDU	48
Tabla 4.8 Escala de la RI, RSE y el índice IR.....	49
Tabla 4.9 Estrategias de mitigación que considera el modelo conceptual	50
Tabla 5.1 Estaciones meteorológicas ubicadas en el SDS de Cali	58
Tabla 5.2 Caudales máximos en el SDS de Cali (m^3/s).....	59
Tabla 5.3 Información considerada en los indicadores de RSE para analizar la resiliencia del SDS de Cali en la condición de línea base	63
Tabla 5.4 Información considerada en los indicadores para analizar la resiliencia del SDS de Cali frente al escenario de amenaza y las estrategias de mitigación.....	64
Tabla 5.5 Distribuciones de probabilidad asignadas a los indicadores	66
Tabla 5.6 RSE del SDS de Cali y sus subcuencas para la condición de línea base.....	68
Tabla 5.7 RSE del SDS de Cali y sus subcuencas para el escenario de amenaza	70
Tabla 5.8 RSE del SDS de Cali y sus subcuencas para la estrategia de mitigación socio-ecológica.....	72
Tabla 5.9 Indicadores jerarquizados, coeficiente de correlación de Spearman, sensibilidad respecto a la contribución a la varianza e incertidumbre de los indicadores con un intervalo de confianza del 90%	75

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2.1 Componentes de la GIAU	4
Figura 2.2 Relación entre superficie impermeable y escorrentía superficial.....	5
Figura 2.3 Interfaces de la infraestructura del SDU con la sociedad y la cuenca urbana.....	5
Figura 2.4 Elementos e interacciones del SI de un SDU.....	6
Figura 2.5 Elementos e interacciones del SSE de un SDU	7
Figura 2.6 Curva teórica de desempeño para determinar la RI	11
Figura 2.7 Paisaje de estabilidad tridimensional con dos estados “cuencas de atracción”.....	11
Figura 2.8 Relación entre riesgo y resiliencia	14
Figura 2.9 Descripción general de los componentes de un SDUR y sus relaciones	17
Figura 2.10 Publicaciones sobre resiliencia en SDU entre el periodo 1979-2021 (a) Número de publicaciones; y (b) Publicaciones por países.....	17
Figura 3.1 Generación de una inundación por fallas del SDU	22
Figura 3.2 Grupos de interés en las temáticas consultadas (1979-2021).....	25
Figura 3.3 Fotografías de las actividades realizadas en las discusiones (a) Reuniones grupo de trabajo proyecto de resiliencia de COLCIENCIAS; (b) Ponencia nacional ACODAL 2016 – Cali, Colombia; (c) Ponencia internacional ICUD 2017 – Praga, República Checa; (d) Taller Club Piedra Linda – Cali, Colombia; (e) Taller Hotel NH – Cali, Colombia; y (f) Pasantía instituto IFAK – Magdeburgo, Alemania	27
Figura 3.4 Metodología empleada para identificar y conceptualizar los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU	28
Figura 3.5 Agrupación de factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU.....	34
Figura 4.1 Curva teórica de desempeño para el análisis de RI en SDU (a) Sin estrategias de mitigación; y (b) Con estrategias de mitigación	41
Figura 4.2 Enfoque convencional para la modelación 1D de inundaciones utilizando un cono virtual.....	43
Figura 4.3 Procedimiento de formulación de un índice de RSE aplicable a SDU	44
Figura 4.4 Bloques temáticos del modelo conceptual	46
Figura 4.5 Modelo conceptual para el análisis de la resiliencia de SDU	52
Figura 5.1 Pasos para la evaluación de un modelo conceptual	55
Figura 5.2 Metodología empleada para evaluar el modelo conceptual en un SDU	57
Figura 5.3 SDS de la ciudad de Cali	58
Figura 5.4 Problemas asociados a la gestión inadecuada del drenaje urbano del SDS de Cali (a) Sedimentos en el Canal Sur; (b) Inundación en la cuenca baja del río Meléndez sector El Ingenio; (c) Residuos sólidos en el Canal Sur; y (d) Asentamientos informales en la cuenca alta del río Meléndez sector Las Palmas.....	60
Figura 5.5 Esquematación en SWMM del SDS de Cali.....	62
Figura 5.6 Eventos de lluvia observados en el SDS de Cali el 22/03/2021	63

Figura 5.7 RI para la condición de línea base en: (a) SDS de Cali; y las subcuencas: (b) Cañaveralejo, (c) Lili, (d) Meléndez, y (e) Ferrocarril.....	67
Figura 5.8 Resiliencia del SDS de Cali y sus subcuencas para la condición de línea base	68
Figura 5.9 RI para el escenario de amenaza de reducción de la permeabilidad del suelo en: (a) SDS de Cali; y las subcuencas: (b) Cañaveralejo, (c) Lili, (d) Meléndez, y (e) Ferrocarril	69
Figura 5.10 RI para las estrategias de mitigación ingenieriles en: (a) SDS de Cali; y las subcuencas: (b) Cañaveralejo, (c) Lili, (d) Meléndez, y (e) Ferrocarril	71
Figura 5.11 Resiliencia del SDS de Cali y sus subcuencas (a) Escenario de amenaza; y (b) Estrategias de mitigación ingenieriles y socio-ecológica.....	72
Figura 5.12 Estadísticos de resumen de las simulaciones de Monte Carlo (a) Densidad de probabilidad del índice IR; y (b) Probabilidad acumulada del índice IR.....	73
Figura 5.13 Análisis de sensibilidad del modelo conceptual a cambios en los indicadores (a) Coeficiente de correlación de Spearman; (b) Sensibilidad de los indicadores respecto a la contribución a la varianza; y (c) Incertidumbre de los indicadores con respecto a la media del índice IR	74
Figura 5.14 Diagramas de dispersión del índice IR en términos de los indicadores de RI: (a) RI por Inundaciones; RSE: (b) Nivel de coordinación institucional, (c) Porcentaje de asentamientos informales, (d) Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación, (e) Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos, (f) Porcentaje de hogares con NBI, (g) Pendiente predominante del terreno en porcentaje, (h) Porcentaje de área impermeable, (i) Porcentaje de áreas verdes, y (j) Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	76

Lista de Abreviaturas y Acrónimos

1D:	Unidimensional
2D:	Bidimensional
ACODAL:	Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
ACP:	Análisis de Componentes Principales
AHP:	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
CGSC:	Contraloría General de Santiago de Cali
CINARA:	Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico
COLCIENCIAS:	Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación
COLFUTURO:	Fundación para el Futuro de Colombia
CVC:	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
DAGMA:	Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente de Cali
DANE:	Departamento Nacional de Estadística
DAPM:	Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Cali
DEM:	<i>Digital Elevation Model</i>
ECCA:	Estudio y Control de la Contaminación Ambiental
EMCALI:	Empresas Municipales de Cali
ESRI:	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
GIAU:	Gestión Integral del Agua Urbana
GIRH:	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
GLUE:	<i>Generalized Likelihood Uncertainty Estimation</i>
ICUD:	<i>International Conference on Urban Drainage</i>
IFAK:	<i>Institut Für Automation und Kommunikation</i>
IR:	Resiliencia Integral
MINCIENCIAS:	Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia
NBI:	Necesidades Básicas Insatisfechas
NSE:	<i>Nash-Sutcliffe Efficiency</i>
ODS:	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU:	Organización de las Naciones Unidas
PERT:	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>
POMCA-LMC:	Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica de los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo
PSMV:	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
PTAP:	Planta de Tratamiento de Agua Potable
PTAR:	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
RI:	Resiliencia Ingenieril
RSE:	Resiliencia Socio-Ecológica
SAT:	Sistemas de Alerta Temprana
SCE:	<i>Shuffled Complex Evolution</i>
SDS:	Sistema de Drenaje Sur
SDU:	Sistema de Drenaje Urbano
SI:	Sistema Ingenieril
SIG:	Sistemas de Información Geográfica
SSD:	<i>Solid State Drive</i>
SSE:	Sistema Socio-Ecológico

SUDS:	Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles
SWMM:	<i>Storm Water Management Model</i>
TR:	Periodo de Retorno
UAESP:	Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos de Cali
UAESPNN:	Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales
UNISDR:	<i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>
UNIVALLE:	Universidad del Valle
USEPA:	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WSM:	<i>Weighted Sum Method</i>
ZCI:	Zona de Convergencia Intertropical

RESUMEN

BLANCO SERGIO. **Modelo Conceptual de Análisis de la Resiliencia Ingenieril y Socio-ecológica para la Sostenibilidad de Sistemas de Drenaje Urbano**. Tesis (Doctorado) - Universidad del Valle, 2022

La resiliencia se define como la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas. A pesar de su importancia, en la práctica usualmente ésta no es considerada en la gestión de los Sistemas de Drenaje Urbano (SDU), lo que contribuiría a mejorar la prestación de éste servicio público, así como a garantizar su sostenibilidad, lo cual es más crítico en países en desarrollo debido a sus condiciones ambientales y sociales. La presente investigación doctoral se orientó a la formulación y evaluación de un modelo conceptual que incorporó tanto el análisis integral de la Resiliencia Ingenieril (RI) y Socio-Ecológica (RSE) en SDU, incorporando conceptos de sostenibilidad, resiliencia y Sistemas Socio-Ecológicos (SSE), experiencias nacionales e internacionales en la gestión del drenaje urbano y diferentes metodologías para el análisis de la resiliencia aplicables en SDU propuestas en la literatura. El modelo fue evaluado en una cuenca urbana de la ciudad de Cali, correspondiente al Sistema de Drenaje Sur (SDS). Este modelo conceptual puede servir como una herramienta de apoyo para los tomadores de decisiones en la gestión de SDU.

Los resultados de la investigación incluyen la identificación y conceptualización de factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU. En el caso de la RI se identificaron cuatro factores clave: *flexibilidad, recursividad, redundancia y robustez* y en la RSE dos: *social y ecológico*. Para el análisis de RI se identificó como variable clave el *desempeño del SDU*, mientras que para el análisis de RSE se identificaron las siguientes variables clave: *gobernanza, riesgo de inundación, residuos sólidos en el SDU, desarrollo económico de la población, características físicas de la cuenca urbana y regulación de inundaciones*. Para cuantificar estas variables, se proponen sus correspondientes indicadores.

El modelo conceptual formulado, integra la RI y la RSE mediante un índice de Resiliencia Integral (IR) y se compone de cuatro bloques temáticos conectados cíclicamente: *i. Definición del SDU; ii. Escenarios de Amenaza; iii. Análisis de Resiliencia; y iv. Formulación de Estrategias*. En el primer bloque, se definen las características del SDU. En el segundo bloque, se identifican las amenazas que puede afrontar el SDU y se formulan los escenarios de amenaza priorizados. En el tercer bloque, se emplean los factores, variables e indicadores de resiliencia para cuantificar la resiliencia del SDU. En el cuarto bloque, se establecen las estrategias de mitigación que se pueden incorporar para mejorar la resiliencia del SDU; una vez incorporadas las estrategias, comienza un nuevo ciclo de análisis.

Finalmente, el proceso de evaluación del modelo conceptual en el SDS, incluyó la evaluación de: *i. La estructura general del modelo y sus relaciones; ii. La concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del SDS; y iii. La sensibilidad del modelo a cambios en los indicadores*. Como resultado, se obtuvo para el SDS valores de RI e índice IR moderados y RSE baja (RI de 0,54, RSE de 0,47 e índice IR de 0,51), los valores de RI, RSE y el índice IR disminuyeron en 7%, 6% y 7% respectivamente cuando se evaluó el efecto de una amenaza consistente en la reducción de la permeabilidad del suelo en 50%; y aumentaron en 20%, 6% y 14% respectivamente cuando se incorporó estrategias de mitigación ingenieriles de limpieza de canales y ríos y embalses en los puntos más críticos de cada subcuenca y una estrategia socio-ecológica de reglamentación en los usos del suelo. Se encontró que el modelo conceptual tiene sensibilidad alta a cambios en el indicador de *RI por inundaciones*, sensibilidad media a cambios en los indicadores de RSE: *porcentaje de área impermeable, porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos y porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación*; y sensibilidad baja en los demás indicadores de RSE.

Palabras claves: Modelo conceptual, sostenibilidad, resiliencia, resiliencia ingenieril, resiliencia socio-ecológica, sistema socio-ecológico, servicios ecosistémicos, drenaje urbano, inundaciones

ABSTRACT

BLANCO SERGIO. **Conceptual Framework of Engineering and Socio-Ecological Resilience Analysis for Urban Drainage Systems Sustainability**. Thesis (Doctorate) - Universidad del Valle, 2022

Resilience is defined as the ability of a system, community or society exposed to a hazard to resist, absorb, adapt and recover from its effects in a timely and effective manner, including the preservation and restoration of its basic structures and functions. Despite its importance, in practice it is usually not considered in Urban Drainage Systems (UDS) management, which would contribute to improving the provision of this public service, as well as guaranteeing its sustainability, which is more critical in developing countries due to their environmental and social conditions. This doctoral research was oriented towards the formulation and evaluation of a conceptual framework that incorporated both the Engineering Resilience (ER) and Socio-Ecological Resilience (SER) analysis in UDS, incorporating concepts of sustainability, resilience and Socio-Ecological Systems (SES), national and international experiences in urban drainage management and different methodologies for resilience analysis applicable in UDS proposed in the literature. The framework was evaluated in an urban basin of the city of Cali, corresponding to the Southern Drainage System (SDS). This conceptual framework can serve as a support tool for decision makers in UDS management.

Research results include the identification and conceptualization of factors, variables and indicators key of resilience in UDS. In the case of ER, four key factors were identified: *flexibility*, *resourcefulness*, *redundancy* and *robustness*, and in the SER two: *social* and *ecological*. For the ER analysis, the *UDS performance* was identified as a key variable, while for the SER analysis the following key variables were identified: *governance*, *flood risk*, *solid waste in UDS*, *economic development of the population*, *physical characteristics of the urban basin* and *flood regulation*. Corresponding indicators were proposed to quantify these variables.

The formulated conceptual framework integrates ER and SER through an Integral Resilience index (IR) and is made up of four cyclically connected thematic blocks: *i*. Definition of the UDS; *ii*. Threat Scenarios; *iii*. Resilience Analysis; and *iv*. Formulation of Strategies. In the first block, the characteristics of the UDS are defined. In the second block, the threats that the UDS can face are identified and the prioritized threat scenarios are formulated. In the third block, the factors, variables and resilience indicators are used to quantify the resilience of the UDS. In the fourth block, the mitigation strategies that can be incorporated to improve the resilience of the UDS are established; once the strategies are incorporated, a new cycle of analysis begins.

Finally, the evaluation process of the conceptual framework in the SDS included the evaluation of: *i*. General structure of the framework and its relationships; *ii*. The concordance between the framework predictions and the UDS data; and *iii*. Framework sensitivity to changes in the indicators. As a result of this evaluation, moderate ER and IR index and low SER values were obtained for the SDS (ER of 0,54, SER of 0,47 and IR index of 0,51), ER, SER and IR index values decreased by 7%, 6% and 7% respectively when was evaluated the effect of a threat consisting of the reduction of soil permeability by 50%; and they increased by 20%, 6% and 14% respectively, when engineering mitigation strategies of channels and rivers cleaning and reservoirs in the most critical points of each sub-catchment and a socio-ecological strategy for land use regulation were incorporated. It was found that the conceptual framework has high sensitivity to changes in the *ER indicator to flooding*, medium sensitivity to changes in the SER indicators: *percentage of impermeable area*, *percentage of solid waste in channels and rivers*, and *percentage of the urban catchment area in high risks flood zone*; and low sensitivity in the other SER indicators.

Keywords: Conceptual framework, sustainability, resilience, engineering resilience, socio-ecological resilience, socio-ecological system, ecosystem services, urban drainage, flooding

ESTRUCTURA GENERAL DE LA TESIS

La tesis se estructuró en seis capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 1. Introducción general. En este capítulo se describe el problema en estudio, la justificación del tema de investigación y los objetivos de la investigación.

Capítulo 2. Revisión de literatura. En este capítulo se revisan los conceptos básicos del tema de investigación como lo son Gestión Integral del Agua Urbana (GIAU), Sistema de Drenaje Urbano (SDU), sostenibilidad, resiliencia, gestión del riesgo en SDU y SDU Resiliente (SDUR). Posteriormente, mediante un análisis bibliométrico se presenta las tendencias del tema de investigación y se identifican los modelos conceptuales de resiliencia aplicables en SDU reportados en la literatura. La parte final del capítulo presenta las brechas en el conocimiento del tema de investigación y la brecha de conocimiento a la cual se contribuyó en esta tesis doctoral.

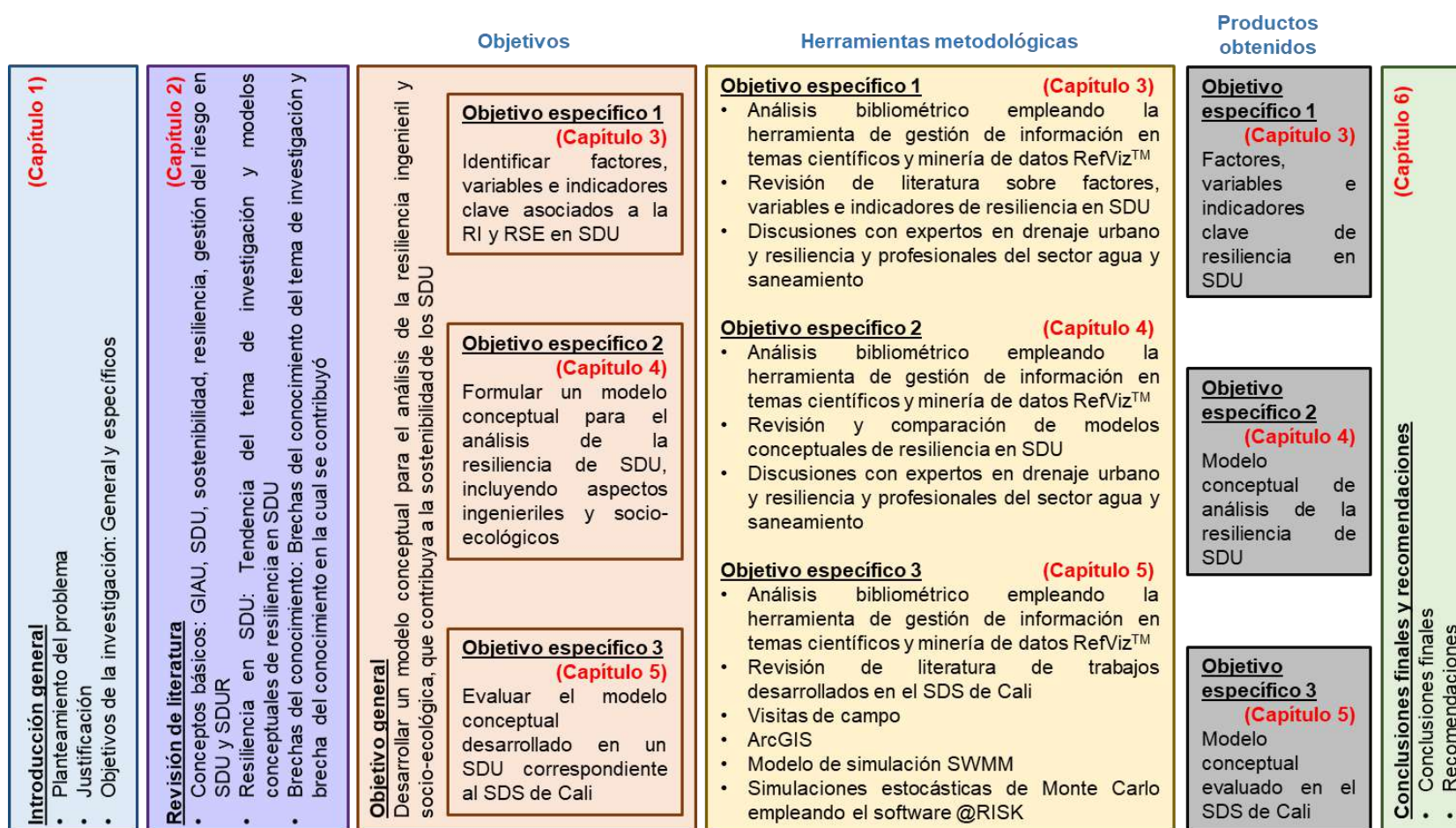
Capítulo 3. Identificación de factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU. En este capítulo y mediante un análisis bibliométrico, se identificaron los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU. El análisis bibliométrico se complementó con discusiones con expertos en drenaje urbano y resiliencia y profesionales del sector agua y saneamiento para mejorar la conceptualización de los factores, variables e indicadores identificados.

Capítulo 4. Formulación del modelo conceptual para el análisis de la resiliencia de SDU. En este capítulo, se revisaron y compararon los modelos conceptuales de resiliencia aplicables a SDU reportados en la literatura teniendo en cuenta elementos clave de su estructura, componentes, principios de funcionamiento y forma de análisis de la resiliencia considerando la Resiliencia Ingenieril (RI) y Socio-Ecológica (RSE) mediante un índice de Resiliencia Integral (IR), esta información fue de gran utilidad para la formulación el modelo conceptual presentado en esta tesis. En la formulación del modelo conceptual se incorporaron aspectos recomendados en discusiones realizadas con expertos en drenaje urbano y resiliencia y profesionales del sector agua y saneamiento.

Capítulo 5. Evaluación del modelo conceptual en un SDU. En este capítulo se evaluó el modelo conceptual formulado en un SDU mediante un estudio de caso, correspondiente al Sistema de Drenaje Sur (SDS) de la ciudad de Cali. La evaluación del modelo se realizó mediante tres pasos: *i.* Se evaluó la estructura general del modelo y las relaciones entre sus elementos mediante un análisis de resiliencia para la condición de línea base del estudio de caso, comparando los resultados con resultados obtenidos en modelos conceptuales de resiliencia identificados en el Capítulo 4; *ii.* Se evaluó la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del estudio de caso, para esto se analizó la resiliencia del estudio de caso frente a un escenario de amenaza y estrategias de mitigación ingenieriles y otra socio-ecológica comparando nuevamente los resultados con resultados obtenidos en modelos conceptuales de resiliencia identificados en el Capítulo 4; y *iii.* Se evaluó la sensibilidad del modelo a cambios en los indicadores empleando simulaciones estocásticas de Monte Carlo. La evaluación realizada en los pasos uno y dos se aprovechó para mostrar el efecto de considerar solo la RI y la RSE versus el efecto de considerar los dos enfoques de resiliencia de forma simultánea.

Capítulo 6. Conclusiones finales y recomendaciones. Se presentan las conclusiones y recomendaciones de la tesis.

La estructura general de la tesis, con los objetivos, las herramientas metodologías empleadas y los productos obtenidos se presenta a continuación.



Estructura general de la tesis

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las ciudades deben ser capaces de afrontar las amenazas emergentes del siglo XXI como el cambio climático, el crecimiento poblacional y urbano y la falta de gobernanza (Butler *et al.*, 2014). Esta situación no solo tendrá repercusiones en el ámbito urbano sino también en el resto del planeta. De acuerdo con Novotny (2008) y Butler *et al.* (2016), la gestión del agua en las ciudades no es sostenible debido a eventos de inundación y contaminación de los cuerpos hídricos que se espera aumenten como resultado de estas amenazas emergentes.

Para que la infraestructura urbana sea capaz de afrontar tales amenazas, es recomendable involucrar en la planeación, diseño, construcción y operación de la misma, la resiliencia, que es definida como “*la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas*” (UNISDR, 2009). Para garantizar su sostenibilidad, estos procesos deben considerar la vulnerabilidad de los sistemas, fallas operacionales, mala interpretación y uso indebido de la información (Blackmore y Plant, 2008). Aunque la sostenibilidad y la resiliencia se relacionan de manera complementaria (Blockley *et al.*, 2012), en la práctica la resiliencia no es usualmente considerada junto con la sostenibilidad.

La resiliencia no se incluye en la planificación y gestión de la infraestructura urbana, incluidos los Sistemas de Drenaje Urbano (SDU), debido en parte a que los tomadores de decisiones no cuentan con metodologías adecuadas para su análisis (Suárez *et al.*, 2016). Por lo tanto, es necesario cambiar de paradigma y reconocer que en las actuales circunstancias lo que se necesita es un desarrollo resiliente, que se adapte a condiciones ecológicas cambiantes donde los SDU puedan recuperarse de las amenazas (Butler *et al.*, 2016; van Duin *et al.*, 2021). Sin embargo, a pesar de las inversiones significativas en infraestructura realizadas en el pasado y los cambios anunciados en los documentos de políticas de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), las perspectivas de adaptación ante las amenazas emergentes no son claras (Barreiro *et al.*, 2020).

Esta situación es más crítica para los países en desarrollo debido a sus condiciones socio-ecológicas, en la mayoría de las cuales la gestión actual de los SDU se ha basado tradicionalmente en la constante expansión de la infraestructura, con un enfoque basado en recolectar y transportar el agua de escorrentía urbana y residual tan pronto como sea posible a través de las redes de alcantarillado (Tucci, 2001; Parkinson y Mark, 2015), descuidando el enfoque integral que toma como base el ciclo urbano del agua y sin considerar la interrelación dinámica con los demás componentes de este ciclo en aspectos como la cantidad y calidad del agua y su impacto en los servicios ecosistémicos. Este enfoque se ha convertido en las últimas décadas en un problema para la gestión de los SDU (Díaz-Granados *et al.*, 2010; Constantino y Dávila, 2011; Karime *et al.*, 2013).

De acuerdo con Novotny (2008) y Butler *et al.* (2016), en la mayoría de las ciudades medianas y grandes, la gestión del agua urbana, incluidos los SDU y su infraestructura relacionada es insostenible, porque a pesar de que estos sistemas están diseñados para ser sostenibles a amenazas en un futuro que se considera fijo, éstas pueden cambiar, bien sea porque las amenazas actuales tienen una gran incertidumbre asociada o por el surgimiento de nuevas amenazas, lo que representa un desafío para la planeación de las ciudades e infraestructura, haciendo necesario pensar en la adaptación (Ahern, 2011).

Sumado a los problemas del enfoque tradicional, la gestión del drenaje urbano también debe considerar las amenazas e incertidumbre de los cambios futuros, los cuales afectarán sus niveles de servicio

y harán necesarias inversiones en infraestructura cada vez más costosas. El concepto de resiliencia contribuye a mejorar la sostenibilidad de las ciudades e infraestructuras en el futuro (Holling, 1996), ya que es una nueva perspectiva o posibilidad para garantizar la sostenibilidad de estos sistemas urbanos a largo plazo, haciéndolos menos vulnerables en un futuro ante amenazas impredecibles, lo que se logra mediante la modificación del enfoque tradicional basado en “probabilidad de falla” por otro basado en la resiliencia del sistema para adaptarse a los cambios, denominado “sistema resiliente” (Ahern, 2011).

Por lo tanto, los SDU, además de superar los problemas actuales, deberán ser resilientes para condiciones futuras en las cuales pueden aparecer nuevas amenazas (Huskova *et al.*, 2016; van Duin *et al.*, 2021). Sin embargo, la mayoría de estudios de resiliencia en SDU consideran principalmente aspectos ingenieriles (Ning *et al.*, 2013; Mugume *et al.*, 2015b; Butler *et al.*, 2016; Binesh *et al.*, 2018; Domínguez, 2018). Una respuesta efectiva a esta problemática conlleva a revisar los conceptos clásicos de ingeniería y a considerar aspectos socio-ecológicos importantes tales como la gobernanza, los residuos sólidos, la gestión del riesgo y los servicios ecosistémicos del drenaje urbano que puedan desarrollar la resiliencia necesaria para hacer a los SDU sostenibles.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El enfoque tradicional de la gestión de los SDU frente al panorama de nuevas amenazas del siglo XXI, requiere una nueva visión donde el drenaje urbano sea concebido no solo para asegurar la prestación de un servicio público, sino también para garantizar la sostenibilidad de los SDU y su resiliencia frente a las amenazas emergentes. La sostenibilidad y la resiliencia son conceptos dinámicos que pueden ser potencializados para evitar impactos negativos sin comprometer la seguridad del sistema (Butler *et al.*, 2014). Aunque el concepto de resiliencia ha sido empleado en otras áreas del conocimiento y se formula recientemente como un concepto clave para la sostenibilidad urbana, a menudo no se emplea en el diseño y planificación urbana contemporánea (Ahern, 2011).

Estudios recientes muestran un progreso significativo hacia la comprensión y evaluación de la resiliencia (Hosseini *et al.*, 2016; Mottahedi *et al.*, 2021). No obstante, son pocos y muy recientes los estudios que se han centrado en el desarrollo de metodologías para el análisis de la resiliencia en SDU (en la literatura se reportan diez estudios desarrollados entre 2013-2019), generándose de esta manera un campo de investigación que requiere profundización (García *et al.*, 2017; van Duin *et al.*, 2021). Estos estudios se enfocan principalmente en la ingeniería y menos en aspectos socio-ecológicos importantes para la resiliencia de SDU.

La gestión de los SDU no ha sido completamente satisfactoria, pues los problemas aún persisten e incluso tienden a empeorar; en este sentido se evidencia la importancia de nuevos modelos, en los cuales el análisis de la resiliencia sea clave para la sostenibilidad, permitiendo a los responsables de la formulación de políticas y los tomadores de decisiones estar más informados (Suárez *et al.*, 2016). De esta manera, se hace necesario desarrollar instrumentos que permitan analizar el nivel de resiliencia de un determinado sistema.

Los modelos conceptuales son herramientas que ayudan a este propósito porque permiten establecer y relacionar de manera general los conceptos, teorías y leyes que gobiernan la infraestructura, la sociedad y la naturaleza y representan gráficamente procesos y relaciones entre un sistema (Ramaswami *et al.*, 2012), dando respuesta a qué tipo de componentes y procesos son esenciales para la dinámica espacio-temporal del sistema, y por qué y cómo se deben tener éstos en consideración (Gertseva y Gertsev, 2006; Sánchez, 2010). De esta manera, un modelo conceptual sirve como una herramienta para el análisis de la resiliencia, contribuyendo a apoyar la toma de decisiones en la gestión de los SDU para contribuir a su sostenibilidad.

Si bien en la literatura se han planteado diferentes modelos conceptuales para el análisis de la Resiliencia Ingenieril (RI) o Socio-Ecológica (RSE), los estudios en general se han centrado en el desarrollo de modelos específicos y no en el análisis integral de las mismas, lo que plantea la oportunidad de desarrollar nuevos modelos de análisis de la resiliencia aplicables a SDU, que idealmente incluyan estos dos enfoques para hacerlos sostenibles.

De acuerdo con lo anterior, la presente tesis doctoral se orientó al desarrollo de una propuesta de modelo conceptual para el análisis de la resiliencia con enfoque en cantidad de agua (inundaciones) incorporando, además de los aspectos ingenieriles del desempeño del SDU, aspectos socio-ecológicos institucionales, de los usuarios, de la cuenca y el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones, lo que brindará más elementos de juicio para la planificación y gestión de estos sistemas frente a amenazas que alteran su estado original, y así contribuir a mejorar la resiliencia y sostenibilidad de los mismos y proporcionar un mayor bienestar. Estas características hacen que el modelo conceptual propuesto sea novedoso y particularmente útil para los tomadores de decisiones en la gestión de los SDU. Los usuarios a quienes está dirigido el modelo conceptual son principalmente tomadores de decisiones en la gestión de SDU a nivel local (autoridades locales y entidades encargadas de la prestación del servicio de alcantarillado).

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo conceptual para el análisis de la resiliencia ingenieril y socio-ecológica, que contribuya a la sostenibilidad de los Sistemas de Drenaje Urbano (SDU).

1.3.2 Objetivos específicos

- i) Identificar los factores, variables e indicadores clave asociados a la Resiliencia Ingenieril (RI) y Socio-Ecológica (RSE) en Sistemas de Drenaje Urbano (SDU).
- ii) Formular un modelo conceptual para el análisis de la resiliencia de Sistemas de Drenaje Urbano (SDU), incluyendo aspectos ingenieriles y socio-ecológicos.
- iii) Evaluar el modelo conceptual desarrollado en un Sistema de Drenaje Urbano (SDU) correspondiente al Sistema de Drenaje Sur (SDS) de la ciudad de Cali.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA URBANA (GIAU)

La GIAU se define como: “Un proceso flexible, participativo e iterativo que integra los elementos de la infraestructura hídrica (suministro de agua, saneamiento, drenaje urbano y residuos sólidos) con el desarrollo urbano de la ciudad y la gestión de cuencas urbanas para maximizar los beneficios ambientales, económicos y sociales de manera equitativa” (Tucci, 2009). Este concepto se fundamenta en la premisa que el diseño y la gestión de los sistemas de agua urbana se basan en el análisis y la optimización de todo el sistema, más que en el análisis de las tareas individuales relacionadas con los servicios de agua urbana y los recursos hídricos (van der Steen y Howe, 2009).

Un enfoque integrado para el diseño y la gestión del agua urbana brinda las siguientes oportunidades para un uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos: i. *Aprovechar las aguas lluvias (recolección de agua de lluvia urbana) y los efluentes de aguas residuales tratadas como fuentes alternativas de suministro de agua;* ii. *El control de la cantidad y calidad de las aguas lluvias para lograr un tratamiento de aguas residuales más eficiente mediante sistemas combinados de alcantarillado;* y iii. *El uso de cuerpos hídricos para la purificación del agua y la protección contra inundaciones* (GWP, 2012).

Además, la GIAU incluye diferentes sectores urbanos como el uso del suelo, la vivienda, la energía y el transporte. Así mismo, este enfoque considera otros usos no urbanos del recurso hídrico, reconoce a la población, las autoridades locales y otros actores que gobiernan las ciudades, y busca el equilibrio económico, la igualdad social y la sostenibilidad (GWP, 2012; Maftuhah *et al.*, 2018). Progresivamente, la GIAU se ha diversificado y también integrado los usos recreativos y estéticos del agua, así como el control de la contaminación para preservar los caudales ecológicos y las características geomorfológicas naturales. La Figura 2.1 describe las actividades interrelacionadas que considera la GIAU.

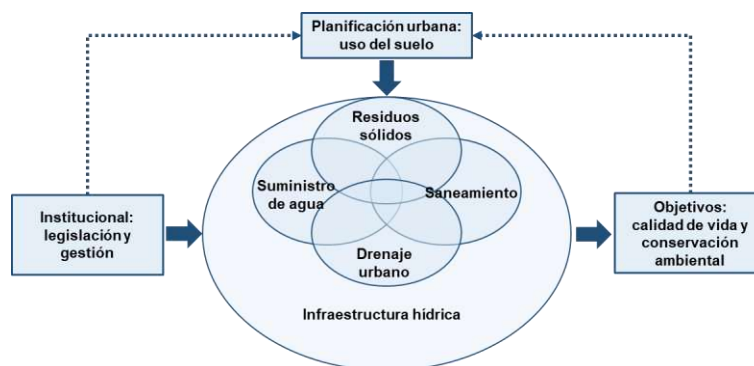


Figura 2.1 Componentes de la GIAU

Fuente: Tucci (2009)

Dentro de la GIAU es importante definir el concepto del ciclo urbano del agua que comienza con la disminución del almacenamiento en elementos cercanos; por ejemplo, los ríos son cubiertos y canalizados, las corrientes son obstruidas o desaparecen y la permeabilidad es reducida o eliminada. Entonces, los componentes del ciclo hidrológico son modificados, por ejemplo, la evapotranspiración se reduce debido a la pérdida de vegetación, la condensación se estimula por la contaminación atmosférica de dióxido de carbono, la precipitación se incrementa por el efecto de “isla de calor” y la infiltración y percolación se reducen debido a la pérdida de permeabilidad del suelo (Butler y Davies, 2011).

En el ciclo hidrológico natural, el mayor porcentaje de agua se mueve por procesos de evapotranspiración e infiltración superficial y/o profunda. Cuando ocurre la urbanización, hay una

progresiva reducción de estos procesos, incrementándose rápidamente la escorrentía, por lo tanto en las áreas urbanas más de la mitad del agua que se precipita se convierte en escorrentía superficial (Marsalek *et al.*, 2006).

El elemento más sensible que determina la escala de los efectos es la cobertura vegetal (especialmente las raíces y rizomas), la cual tiene una influencia considerable en la porosidad, estructura y contenido de humedad del suelo; adicionalmente, las trayectorias del flujo sub-superficial y la temperatura en la ciudad, están altamente condicionadas por la cobertura vegetal (Karime *et al.*, 2013). De esta manera, las áreas que están altamente cubiertas por vegetación tienden a producir menores volúmenes de escorrentía que las áreas altamente urbanizadas.

La Figura 2.2 ilustra la forma cómo el balance hídrico es modificado a través de la urbanización. Allí se observa que la superficie impermeable (vías, parqueaderos, aceras y cubiertas) en un área urbana genera un aumento de la escorrentía superficial. De acuerdo con FISRWG (2000), tan sólo un incremento en el 10 por ciento de la superficie impermeable en un área urbana puede generar degradación de una corriente.

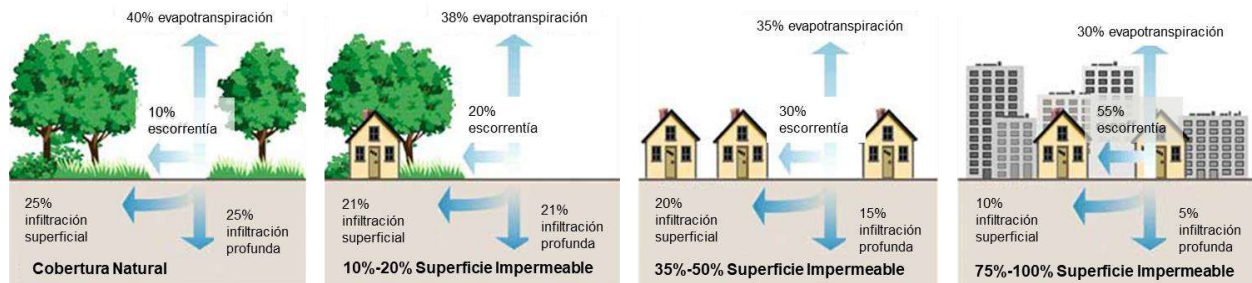


Figura 2.2 Relación entre superficie impermeable y escorrentía superficial

Fuente: FISRWG (2000)

2.2 SISTEMA DE DRENAJE URBANO (SDU)

Un SDU es necesario en áreas urbanas debido a la interacción entre el ciclo urbano del agua y la actividad humana. Esta interacción da lugar a dos tipos de agua que requieren drenaje: agua lluvia y agua residual; si éstas no se drenan adecuadamente, podrían causar inundaciones, contaminación, daños y crear riesgos para la salud (Butler y Davies, 2011). Un SDU maneja estos dos tipos de efluentes para minimizar los problemas causados a la vida humana y al medio ambiente, por esto su infraestructura cuenta con dos interacciones principales: con la sociedad y la cuenca urbana (Figura 2.3); dividiéndose en dos sistemas: el Sistema Ingenieril (SI) y el Sistema Socio-Ecológico (SSE) (Butler y Davies, 2011).

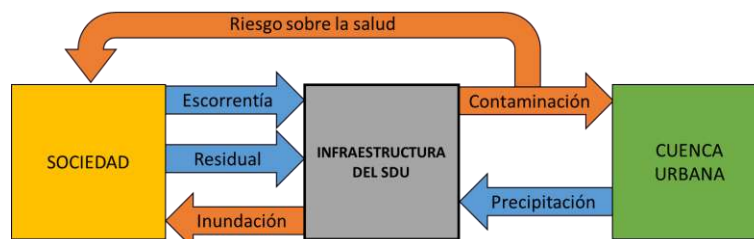


Figura 2.3 Interfaces de la infraestructura del SDU con la sociedad y la cuenca urbana

Fuente: Adaptado de Butler y Davies (2011)

El SI corresponde a la infraestructura del SDU y los procesos que se desarrollan en él (recolección, transporte, tratamiento y disposición de las aguas lluvias y residuales) (Grabowski *et al.*, 2017; Markolf *et al.*, 2018). Mientras que el SSE corresponde a la integración de la sociedad y la cuenca urbana que interactúa

con el SI, centrándose no solo en los componentes de cada uno, sino también en sus interacciones y retroalimentaciones (Walker *et al.*, 2004).

El SI se compone de tres subsistemas (Schütze *et al.*, 2002): *i.* Escorrentía urbana y red de alcantarillado; *ii.* Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR); y *iii.* Cuerpo receptor.

En la Figura 2.4 se presenta un esquema de los elementos que componen el SI de un SDU y sus interacciones.

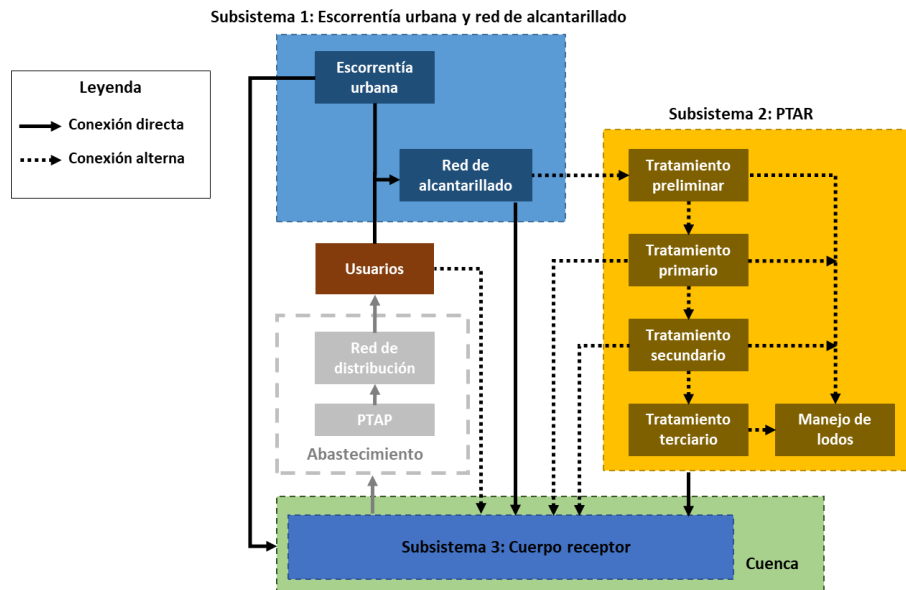


Figura 2.4 Elementos e interacciones del SI de un SDU

Fuente: Schütze *et al.* (2002)

El subsistema 1 (escorrentía urbana y red de alcantarillado) consiste por una parte en la proporción de agua lluvia que se transforma en escorrentía y escurre sobre las superficies urbanas, cuyas propiedades en términos de cantidad y calidad del agua están intrínsecamente vinculadas a las características tanto de la lluvia como de la cuenca urbana y por otra parte en los elementos del alcantarillado tales como sumideros, pozos de inspección, conductos, tanques de almacenamiento, bombas y aliviaderos entre otros que permiten recolectar, transportar y almacenar las aguas lluvias y residuales (Butler y Davies, 2011).

El subsistema 2 (PTAR) corresponde a la infraestructura de tratamiento de aguas residuales, que considera cuatro niveles de tratamiento: preliminar (cribado y remoción de arenas), primario (sedimentación), secundario (biológico y químico), además del manejo de lodos que se producen de los tratamientos anteriores (Davies, 2011). Sin embargo, en la práctica no todas las PTAR llegan a tratamiento secundario, siendo el tratamiento preliminar y primario los más frecuentes. Algunas PTAR dependiendo de los requerimientos de tratamiento, los cuales deben analizarse en el contexto de la cuenca, también aplican métodos de tratamiento terciario o avanzado para reducir aún más la contaminación, particularmente asociada al contenido de nutrientes, patógenos y contaminantes complejos en el efluente (Schütze *et al.*, 2002).

El subsistema 3 (cuerpo receptor) corresponde al cuerpo hídrico que recibe los efluentes de la red de alcantarillado y la PTAR. Cuando el impacto de estos efluentes supera la capacidad de dilución y asimilación de contaminantes del cuerpo receptor, se pueden generar impactos que llevan fácilmente a un efecto sinérgico perjudicial para el cuerpo receptor, lo cual causa una condición de calidad que limita sus usos, en particular los usos para los cuales ha sido concebido. Esto puede ser diferente en distintos tramos del recurso hídrico, en el caso de un río. En este sentido, la relevancia de los impactos para un cuerpo

receptor en particular depende del uso del agua; por lo tanto, la calidad ecológica requerida de un cuerpo receptor se define por su uso como tal y generalmente no depende de su tipo (Schütze *et al.*, 2002).

Por su parte, el SSE se compone de dos subsistemas (Salas *et al.*, 2011): i. Social; y ii. Ecológico. Dentro del dominio del subsistema social, se consideran las instituciones y usuarios incluyendo aspectos como la cultura, la economía, la política y la organización social (la sociedad misma), mientras que el dominio del subsistema ecológico considera la cuenca urbana y los servicios ecosistémicos del SDU (Martín *et al.*, 2009; Salas *et al.*, 2011).

En la Figura 2.5 se presenta un esquema de los elementos que componen el SSE de un SDU y sus interacciones.

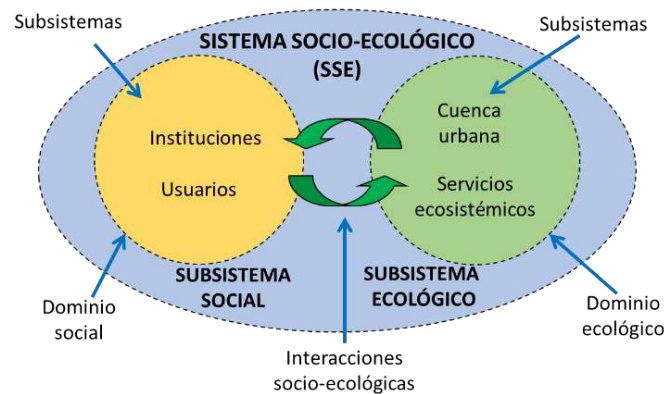


Figura 2.5 Elementos e interacciones del SSE de un SDU

Fuente: Adaptado de Salas *et al.* (2011)

El SSE contiene componentes tanto humanos como ecológicos, es complejo y adaptativo, por lo cual las interacciones entre estos componentes se abordan desde la teoría de los “sistemas complejos adaptativos”, que se distinguen de otros sistemas por su capacidad de responder a las perturbaciones en su ambiente, a través de la auto-organización, aprendizaje y respuesta (Norberg y Cumming, 2008).

De acuerdo con Martín *et al.* (2009), los vínculos existentes en el SSE son multiescalares, tanto desde lo local como lo global; el subsistema social está compuesto por los usuarios y las instituciones a mayor escala, así como por las relaciones que se establecen entre ellos; por su parte, el subsistema ecológico está compuesto por la cuenca urbana, así como por la relación que se establece entre el subsistema social y la cuenca urbana a través de los servicios ecosistémicos.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los servicios ecosistémicos son: “Los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas. Estos incluyen servicios de aprovisionamiento, regulación y culturales, que afectan directamente a las personas, y servicios de apoyo necesarios para mantener los otros servicios. Los cambios en estos servicios afectan el bienestar humano a través de los impactos en la seguridad, el material necesario para una buena vida, la salud y las relaciones sociales y culturales. Estos componentes del bienestar están, a su vez, influenciados por las libertades y opciones disponibles para las personas y tienen influencia en ellas” (ONU, 2003).

Los servicios ecosistémicos más importantes que brinda el SDU son los asociados a la regulación de la contaminación del agua y de inundaciones (Moores y Semadeni-Davies, 2015), esto obedece a la influencia directa que tienen los SDU para ayudar a remover los contaminantes transportados por la lluvia y a reducir el volumen de escorrentía y el caudal pico (Tahmasebi Birgani y Yazdandoost, 2018).

En la Tabla 2.1 se presenta la descripción de los principales servicios ecosistémicos que brinda el SDU.

Tabla 2.1 Principales servicios ecosistémicos que brinda el SDU

Servicio ecosistémico	Descripción	Objetivos del servicio ecosistémico
Regulación de la contaminación del agua	Beneficio en la disminución de la contaminación del agua	• Remover o reducir concentraciones de contaminantes transportados por la lluvia. • Cumplir con los estándares de calidad del agua de los cuerpos receptores de descargas de acuerdo a los usos del agua para apoyar la salud de estos.
Regulación de inundaciones	Beneficio en la disminución de las inundaciones	• Controlar caudales para proveer el caudal base y la recarga de agua subterránea evitando inundaciones. • Reducir el caudal de aguas superficiales a la red de alcantarillado, a dispositivos de almacenamiento de aguas lluvias o al cuerpo receptor. • Recolectar agua lluvia.

Fuente: Niemelä *et al.* (2011) y Moores y Semadeni-Davies (2015)

2.3 SOSTENIBILIDAD

La rápida urbanización, unida a las inadecuadas prácticas de ingeniería, entre otros, ha llevado al agotamiento de los recursos hídricos. En este contexto, surge en los años 70's el concepto de desarrollo sostenible relacionado con el manejo y gestión de los recursos naturales (IUCN, 1980); posteriormente, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas realizó el informe denominado *Nuestro Futuro Común*, mejor conocido como *Informe Brundtland* (WCED, 1987) en el cual se definió el desarrollo sostenible como: “*El desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades*”. Este informe abrió las vías políticas para el reconocimiento mundial de los términos sostenibilidad y desarrollo sostenible.

En la Cumbre de la Tierra (ONU, 1992), se aclaró el concepto de sostenibilidad en la Declaración de Río de Janeiro también llamada *Carta de la Tierra* integrada por 27 principios, de los cuales tres se refieren explícitamente a la sostenibilidad: Principio 1. “*Los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible*”; Principio 3. “*El derecho al desarrollo debe ejercerse en forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las generaciones presentes y futuras*”; y Principio 4. “*A fin de alcanzar el desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente deberá constituir parte integrante del proceso de desarrollo y no podrá considerarse en forma aislada*”.

Posteriormente, en la Cumbre de la Tierra de Johannesburgo para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, también llamada Río+10 (ONU, 2002), se reafirmó que el desarrollo sostenible es un elemento central en la agenda internacional y se amplió y fortificó el contenido del desarrollo sostenible, particularmente la vinculación entre pobreza, medio ambiente y uso de los recursos naturales.

Particularmente, con referencia a los recursos hídricos Mays (2007) presentó una definición de sostenibilidad de los recursos hídricos que cumple con una definición más general que la planteada por el Informe Brundtland, donde la sostenibilidad de los recursos hídricos es: “*La capacidad de utilizar el agua en cantidades suficientes y de calidad, desde la escala local a la global, para satisfacer las necesidades de los seres humanos y los ecosistemas para el presente y el futuro, para mantener la vida y para proteger a los humanos de los daños causados por amenazas que afectan la sostenibilidad de la vida*”. Esta definición involucra la protección de los recursos hídricos y también la gestión del riesgo por las amenazas.

La dificultad con la definición de sostenibilidad de los recursos hídricos es que, aunque sus principios son ampliamente aceptados, no es claro cómo ponerlos en práctica. Butler y Davies (2011) han considerado y argumentado cuáles podrían ser los objetivos de un SDU sostenible y han propuesto la siguiente lista en orden de prioridad:

- Mantenimiento de una barrera de salud pública eficaz.
- Evitar inundaciones locales o distantes.

- Evitar la contaminación local o distante del medio ambiente (agua, suelo y aire).
- Minimización de la utilización de recursos naturales (agua, nutrientes, energía y materiales).
- Confiabilidad a largo plazo y resiliencia a las condiciones futuras (aún desconocidos).

La lista se puede ampliar para incluir requisitos más amplios como (Banco Mundial, 2012):

- Asequibilidad comunitaria.
- Aceptabilidad social.

2.4 RESILIENCIA

2.4.1 Evolución del concepto de resiliencia

El concepto de resiliencia surgió de la ecología en los años 60's a través de estudios de interacción de poblaciones de depredadores y presas y sus respuestas funcionales en relación con la teoría de estabilidad ecológica. Holling (1973) planteó que: *“La resiliencia determina la persistencia de las relaciones dentro de un sistema y es una medida de la capacidad de estos sistemas para absorber los cambios de variables de estado, variables de conducción y parámetros, y así persistir”*.

Años después, Holling (1996) adicionó el concepto de Resiliencia Ingenieril (RI), la cual se enfoca en la capacidad de recuperación de un sistema artificial en un contexto de equilibrio estable. Holling (1996) definió la RI como: *“La magnitud de la perturbación que puede ser absorbida antes de que el sistema redefina su estructura funcional, cambiando las variables y procesos que controlan el comportamiento”* la cual se caracteriza por analizar la capacidad de amortiguación, resistir perturbaciones y mantener funciones del sistema en un contexto de estabilidad global.

Posteriormente, teniendo en cuenta que las diferentes interpretaciones de resiliencia que habían surgido causaban confusión y argumentando que la resiliencia de un sistema necesita ser considerada en términos de los atributos que gobiernan las dinámicas del mismo, Walker *et al.* (2004) adicionaron otra categoría: la Resiliencia Socio-Ecológica (RSE) definida como: *“El potencial que tiene un sistema de tolerar perturbaciones, sin colapsar hacia un estado cualitativamente diferente manteniendo su estructura y función, lo cual involucra la capacidad del mismo para reorganizarse siguiendo cambios impulsados por perturbaciones”*.

La RSE se caracteriza por analizar las interacciones entre perturbaciones y reorganización, y sostenimiento y desarrollo en el SSE, enfocándose en la capacidad de adaptación, transformabilidad, aprendizaje e innovación en un contexto de equilibrio inestable. Este concepto modificó el pensamiento que considera los sistemas como estables, por uno en el cual se considera la capacidad que tienen éstos para adaptarse y cambiar, aumentando la probabilidad de un desarrollo sostenible en ambientes cambiantes donde el futuro es impredecible. Esta categoría es la más amplia, puesto que relaciona la resiliencia con los SSE, centrándose no solo en los componentes del SSE, sino también en sus interacciones y retroalimentaciones (Walker *et al.*, 2004).

Folke (2006a) describió la RSE como: *“Un enfoque o manera de pensar, que presenta una perspectiva para guiar y organizar el pensamiento con un sentido más amplio, proporcionando un marco valioso para el análisis de los SSE”*, siendo ésta un área que se encuentra en investigación exploratoria bajo un rápido desarrollo con implicaciones políticas para el desarrollo sostenible (Cumming, 2011).

La definición más aceptada de resiliencia es la de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR por su abreviatura en inglés) quien la definió como: *“La capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y*

restauración de sus estructuras y funciones básicas” (UNISDR, 2009). Este concepto asocia la resiliencia con las amenazas y los efectos que estas pueden ocasionar en la infraestructura y en los SSE.

En 2015, la ONU desarrolló la *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (2016 - 2030), la cual formuló 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que incluyen 169 metas (ONU, 2015). En éstos, la ONU ha manifestado la pertinencia de involucrar el concepto de resiliencia en la planeación, diseño y construcción de los sistemas de agua urbana, lo cual se evidencia principalmente en dos ODS: Objetivo 9. “Construir infraestructura resiliente, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación” y Objetivo 11. “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”. Esto pone de manifiesto la necesidad que tienen las ciudades e infraestructura asociada, de adaptarse a las amenazas emergentes para lograr la sostenibilidad y adicionalmente plantea la necesidad de involucrar la RI y RSE para un análisis integral de la resiliencia.

De esta manera, el concepto de resiliencia ha evolucionado durante casi de 50 años, desde una visión estrecha y con aplicaciones puntuales de RI a una visión más amplia de RSE que abarca un entorno de aplicación más general, lo que ha permitido su empleo en diferentes contextos durante el tiempo. Aplicar este concepto en la gestión de SDU es fundamental para afrontar las amenazas del siglo XXI.

2.4.2 Resiliencia Ingenieril (RI)

La RI se ha definido recientemente en agua urbana como: “*El grado en el cual el SI reduce la duración y magnitud de las fallas en el servicio durante su periodo de diseño cuando se somete a amenazas*” (Butler *et al.*, 2014; Butler *et al.*, 2016). Básicamente, es una medida de cómo funciona la infraestructura del SDU cuando está sujeto a amenazas que exceden las condiciones de diseño, causando que el SDU no pueda cumplir con el nivel de servicio requerido (Butler *et al.*, 2016). De esta manera este concepto evalúa la capacidad de recuperación de la infraestructura, manteniendo su estructura y funciones básicas (Blackmore y Plant, 2008).

En el contexto de SDU, la infraestructura está diseñada para proporcionar un servicio continuo (ininterrumpido) a la sociedad de manera eficiente (Holling, 1996; Blackmore y Plant, 2008; Park *et al.*, 2013). La RI se enfoca en evaluar la eficiencia del desempeño de la infraestructura durante una falla (Lansey, 2012; Park *et al.*, 2013; Butler *et al.*, 2014).

Por lo tanto, el objetivo de la RI es soportar las fallas tanto como sea posible y recuperarse de éstas cuando ocurren, lo cual se puede representar mediante una función matemática de minimización, en la que la RI dependerá de la duración y magnitud de las fallas (Ecuación 2.1) (Butler *et al.*, 2014).

$$RI = \min(\text{falla: duración, magnitud}) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

La Figura 2.6 permite aclarar el concepto de RI; en ésta se observa que el desempeño de un SDU, $D(t)$, varía con el tiempo entre 0 y 1, donde 0 se relaciona con el colapso del SDU y 1 representa un servicio sin falla. Si un evento de amenaza (condición que pone a prueba el SDU, ej., incremento de la lluvia, reducción de la permeabilidad del suelo, vertimiento de aguas residuales, etc.), ocurre en el tiempo t_0 , este podría causar una falla entre el tiempo de inicio de la falla t_f y el tiempo de recuperación t_r , comprometiendo la calidad del servicio (ej., inundaciones y/o contaminación del agua), y poniendo a prueba su desempeño.

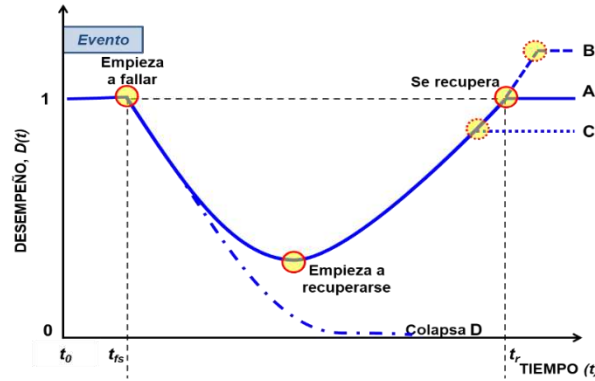


Figura 2.6 Curva teórica de desempeño para determinar la RI

Fuente: Adaptado de Bruneau *et al.* (2003); Chang y Shinozuka (2004); Wang y Blackmore (2009) y Mugume *et al.* (2015b)

De acuerdo con Mugume *et al.* (2015b), Mugume y Butler (2016) y Wang *et al.* (2019b), la RI se cuantifica como el grado de recuperación del servicio durante el tiempo de falla, lo cual se define gráficamente como el área normalizada bajo la curva teórica de desempeño entre el tiempo de inicio de la falla t_{fs} y el tiempo de recuperación t_r ; es decir:

$$RI = \frac{1}{t_r - t_{fs}} \int_{t_{fs}}^{t_r} D(t) dt \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Se observa también en la Figura 2.6 que el SI no necesariamente vuelve a su condición inicial (**Caso A**) después de un evento, pudiéndose observar tres escenarios más: **Caso B**, puede mejorar su desempeño a través de estrategias de mitigación; **Caso C**, puede sufrir alguna pérdida permanente de su desempeño inicial; o **Caso D**, en el peor de los casos, sufrir un colapso, para lo cual se requerirá de una intervención de la infraestructura. Es importante indicar que el análisis de RI es aplicable a infraestructuras que prestan un servicio público, y se enfoca en la reducción o pérdida de la calidad del servicio y en su subsecuente recuperación (Blackmore y Plant, 2008).

2.4.3 Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)

La RSE se define como: “El potencial que tiene el SSE de tolerar fallas, sin colapsar hacia un estado cualitativamente diferente manteniendo su estructura y funciones, lo cual involucra la capacidad del mismo para adaptarse siguiendo cambios impulsados por amenazas” (Walker *et al.*, 2004). Este concepto considera las características del SSE y la identificación de las relaciones entre múltiples niveles en diferentes escalas espaciales (local, regional y nacional) y temporales (corto, mediano y largo plazo) (Berkes y Folke, 2000; Norberg y Cumming, 2008).

Conceptualmente la RSE es explicada por Walker *et al.* (2004), mediante la metáfora de “cuencas de atracción” tridimensional mostrada en la Figura 2.7.

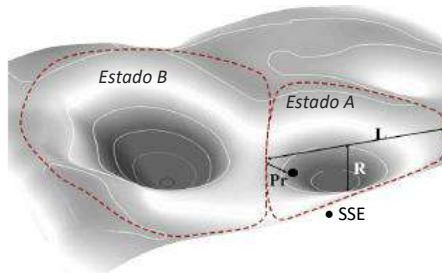


Figura 2.7 Paisaje de estabilidad tridimensional con dos estados “cuencas de atracción”

Fuente: Walker *et al.* (2004)

En la Figura 2.7 la cuenca de atracción es una región en el espacio de estados en los que el SSE tiende a mantenerse y el SSE es una esfera que se mueve dentro de la cuenca de atracción. De acuerdo con esta metáfora, todos los SSE son golpeados continuamente por amenazas que tienden a moverlos fuera de su estado o condición inicial (**Estado A**) a otro estado (**Estado B**), en el cual el SSE tendría un cambio en su estructura y funciones. En esta metáfora, las distintas cuencas que un SSE puede ocupar y las fronteras que los separan, se conocen como “paisaje de estabilidad”. La Figura 2.7 también presenta tres características metafóricas de la RSE (*latitud, resistencia y persistencia*) para una cuenca en un paisaje con dos estados atractores (Walker *et al.*, 2004), donde:

- *Latitud-L*: La máxima cantidad de veces que un SSE puede cambiar antes de perder su capacidad de recuperación.
- *Resistencia-R*: La facilidad o dificultad que tiene el SSE de cambiar, que tan “resistente” es para ser cambiado.
- *Persistencia-Pr*: Lo cercano que el estado actual del SSE está con respecto a un límite o “umbral”. Donde el umbral es el límite en el cual el SSE puede cambiar a un nuevo estado, que puede ser deseable o indeseable dependiendo de las condiciones iniciales del SSE.

Por lo anterior, el objetivo de la RSE es reducir el riesgo del SSE a las fallas del SI para evitar que el SSE se mueva a estados no deseados en presencia de amenazas (Walker *et al.*, 2004; Blackmore y Plant, 2008; Carpenter *et al.*, 2014).

2.5 GESTIÓN DEL RIESGO EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO

2.5.1 Amenaza

Una amenaza se ha definido recientemente en SDU como: “*Cualquier evento con el potencial de reducir el grado en el que el SDU brinda un nivel de servicio definido*” (Butler *et al.*, 2016). Las amenazas se pueden clasificar de varias formas y pueden ser del contexto o específicas del SDU. Un enfoque muy utilizado consiste en clasificar las amenazas como externas o internas dependiendo de su origen (Westrum, 2006; Lansey, 2012).

En este enfoque las amenazas externas se relacionan con amenazas influenciadas de cualquier fuerza, entidad o actor externo (el entorno natural o construido y las instituciones reguladoras), mientras que las amenazas internas denotan una amenaza que se origina en la infraestructura, el proveedor del servicio y los usuarios (Butler *et al.*, 2016). Las amenazas externas se caracterizan por ocasionar fallas funcionales en el SDU producto de cambios en los caudales de entrada o las cargas contaminantes, mientras que las amenazas internas se caracterizan por ocasionar fallas estructurales en elementos de la infraestructura del SDU (aliviaderos, bombas, canales, PTAR, tanques o tuberías) que hacen que el elemento defectuoso o dañado no pueda cumplir la función deseada en su totalidad o en parte (Mugume *et al.*, 2015b).

Esta clasificación tiene como objetivo apoyar una mejor identificación de las amenazas en una variedad de contextos por parte de los proveedores del servicio, los encargados de formular políticas y los reguladores del servicio (Butler *et al.*, 2016). La clasificación también puede facilitar un enfoque de análisis más específico y ayudar a priorizar las estrategias para mitigar su impacto.

En la Tabla 2.2 se describen los tipos de amenazas que afrontan los SDU y ejemplos de amenazas y fallas del SDU producto de las amenazas. Las amenazas en la práctica se deben considerar de acuerdo con el SDU en estudio.

Tabla 2.2 Tipos de amenazas que afrontan los SDU y ejemplos de amenazas y fallas

Tipo	Descripción	Ejemplos de amenazas	Ejemplos de fallas
Externas	Se relaciona con amenazas influenciadas de cualquier fuerza, entidad o actor externo (el entorno natural o construido y las instituciones reguladoras del servicio). Estas amenazas causan fallas funcionales en el SDU	• Incremento de aguas residuales. • Incremento de la intensidad de lluvias. • Reducción de la permeabilidad del suelo. • Vertimiento de aguas lluvias y/o residuales sin tratamiento.	• Sobrecarga hidráulica debido a cambios en los caudales de entrada (inundaciones). • Contaminación de cuerpos receptores debido a cambios en las cargas contaminantes. • Contaminación de cuerpos receptores debido a la reducción del oxígeno disuelto o la generación de condiciones anaerobias en un determinado tramo del cuerpo receptor.
Internas	Denota una amenaza que se origina al interior del SDU (infraestructura, proveedor del servicio y los usuarios). Estas amenazas causan fallas estructurales en elementos de la infraestructura del SDU	• Conexiones erradas. • Obstrucciones por residuos sólidos (basuras, escombros y sedimentos). • Daños de uno o varios elementos de la infraestructura del SDU (aliviaderos, bombas, canales, PTAR, tanques o tuberías).	• Sobrecarga hidráulica debido a cambios en la capacidad hidráulica (inundaciones). • Inundación debido a daños de uno o varios elementos de la infraestructura del SDU (aliviaderos, bombas, canales, tanques o tuberías). • Contaminación debido a conexiones erradas. • Contaminación debido a daños de uno o varios elementos de la infraestructura del SDU (aliviaderos, bombas, canales, PTAR, tanques o tuberías).

Fuente: Adaptado de Mugume *et al.* (2015b) y Butler *et al.* (2016)

2.5.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se define como: “*Las características y circunstancias de un sistema que lo hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza*” (UNISDR, 2009). Esta definición identifica la vulnerabilidad como una característica de los elementos de interés del SDU que es independiente de su exposición. Sin embargo, con frecuencia este concepto se utiliza más ampliamente para también incluir el grado de exposición de estos elementos.

Existen diversos aspectos de la vulnerabilidad que surgen de varios factores físicos, sociales, económicos y ambientales. Entre los ejemplos se incluyen el diseño inadecuado y la construcción deficiente de la infraestructura, la protección inadecuada de los bienes, la falta de información y de concientización pública y un conocimiento limitado del riesgo. La vulnerabilidad varía considerablemente dentro de un SDU y en el transcurso del tiempo. La vulnerabilidad involucra tres conceptos: exposición, susceptibilidad y resiliencia (UNISDR, 2009; Balica y Wright, 2010; Mumby *et al.*, 2014); donde:

- **Exposición:** Es el grado en que el SDU está expuesto a una amenaza determinada, se genera por una relación no apropiada entre el SI y el SSE, está asociado a las características de la cuenca urbana, los servicios ecosistémicos que brinda el SDU y los usuarios.
- **Susceptibilidad:** Es el grado de fragilidad del SDU para afrontar una amenaza, se centra en las condiciones sociales que alteran al SDU, se puede deber a procesos no planificados de crecimiento urbano y poblacional y a políticas públicas no sostenibles.
- **Resiliencia:** Es la capacidad del SDU de adaptarse a la amenaza.

Estos tres conceptos se pueden relacionar mediante la ecuación teórica de la vulnerabilidad (Zúñiga, 2018):

$$\text{Vulnerabilidad} = \frac{\text{Exposición} \times \text{Susceptibilidad}}{\text{Resiliencia}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde la exposición y la susceptibilidad aumentan la vulnerabilidad, mientras que la resiliencia la reduce.

2.5.3 Riesgo

El riesgo se define como: “La probabilidad de que se produzcan daños o pérdidas ambientales, económicas o sociales en determinadas circunstancias desfavorables” (UNISDR, 2009). La idea básica de este concepto es relacionar la probabilidad de ocurrencia de una falla con la magnitud de los daños o pérdidas que ocasionaría (Butler y Davies, 2011; Jha *et al.*, 2012). El riesgo se relaciona con la amenaza, vulnerabilidad y recientemente la resiliencia, donde la amenaza y vulnerabilidad aumentan el riesgo y la resiliencia por el contrario lo reduce (Scholz *et al.*, 2012; Sweetapple *et al.*, 2018).

La resiliencia se enfoca principalmente en reducir el riesgo ocasionado por los eventos extremos que se pueden anticipar (riesgo medio o alto) (Mueller y Stewart, 2016), por lo cual la resiliencia es fundamental para reducir el riesgo de los SDU y así garantizar su sostenibilidad a futuro en condiciones de incertidumbre (Hauger *et al.*, 2006). De acuerdo con Hollnagel *et al.* (2006) y Blackmore y Plant (2008), se debe asegurar que los SDU sean y permanezcan seguros frente a los cambios futuros. Para lograrlo, los SDU deben volverse resilientes.

La Figura 2.8 muestra cómo se relaciona el riesgo y la resiliencia con respecto a la probabilidad de eventos de falla de un SDU y la magnitud de los daños y pérdidas que ocasionarían.

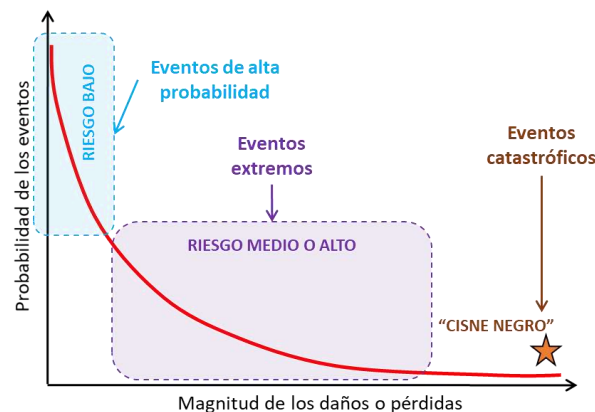


Figura 2.8 Relación entre riesgo y resiliencia

Fuente: Butler *et al.* (2014) y Sweetapple *et al.* (2018)

En la Figura 2.8 se identifican tres tipos de eventos (Butler *et al.*, 2014; Sweetapple *et al.*, 2018):

- **Eventos de alta probabilidad:** Se espera que sucedan frecuentemente y pueden causar daños o pérdidas de baja magnitud, tienen Periodos de Retorno (TR) entre 1 y 10 años y generan un riesgo bajo.
- **Eventos extremos:** Se pueden anticipar y asignar una probabilidad, pueden causar daños o pérdidas de mediana y alta magnitud, tienen TR entre 10 y 100 años y generan un riesgo medio o alto.
- **Eventos catastróficos:** No se pueden anticipar, no se les puede asignar una probabilidad, causan el colapso del SDU, daños y pérdidas de magnitud incuantificable y tienen TR superiores a 100 años (cisne negro). Los eventos catastróficos son atípicos, se encuentran fuera del ámbito de las expectativas regulares y cuando suceden generan consecuencias graves e impredecibles (Taleb, 2009). Los eventos catastróficos están fuera del alcance de cualquier análisis y no hay forma de mitigarlos porque su probabilidad es desconocida.

2.5.4 Estrategias de mitigación

El proceso de urbanización y el control del uso del suelo urbano deben pensarse para minimizar los impactos sobre el ciclo hidrológico natural (Canholi, 2005), por lo tanto, los SDU deben planificarse,

diseñarse, construirse y operarse de manera integrada con el crecimiento urbano y las obras de drenaje deben integrarse con la cuenca (Miguez *et al.*, 2007). El drenaje urbano también deben considerar un amplio conjunto de aspectos y debe integrarse con la política de uso del suelo, la planificación urbana, los códigos de construcción y toda la normatividad relacionada. Es decir, que para mitigar el riesgo y así mejorar la resiliencia en los SDU se exige la adopción de un conjunto variado de estrategias de mitigación (Miguez *et al.*, 2007; Butler y Davies, 2011).

En este contexto, las estrategias de mitigación se definen como: “*Cualquier acción física o no física que se tome para reducir el riesgo y así mejorar la resiliencia de los sistemas frente a las amenazas*” (UNISDR, 2009). Así mismo, es importante mencionar que el riesgo no puede evitarse, sin embargo, se puede mitigar con la implementación de estrategias para minimizar las consecuencias negativas. De acuerdo con Tucci (2007) y Miguez *et al.* (2012), es posible distinguir dos tipos de estrategias de mitigación: *i.* Ingenieriles; y *ii.* Socio-ecológicas.

Las primeras introducen medidas que producen modificaciones físicas en el SDU y en la cuenca con la intención de cambiar la relación lluvia-escorrentía, reorganizar los patrones de flujo y reducir la contaminación del agua (Tucci, 2007; Miguez *et al.*, 2012); y las segundas trabajan con medidas no físicas que pretenden permitir una convivencia más armónica con el riesgo (Tucci, 2007). Éstas estrategias se pueden combinar para generar efectos sinérgicos en la reducción del riesgo y así mejorar la resiliencia de los SDU (Butler *et al.*, 2016).

En la Tabla 2.3 se describen los tipos de estrategias para mitigar el riesgo y mejorar la resiliencia de los SDU y sus ejemplos.

Tabla 2.3 Tipos de estrategias de mitigación del riesgo y sus ejemplos

Tipo	Descripción	Ejemplos de estrategias
Ingenieriles	Estrategias que producen modificaciones físicas en el SDU y la cuenca para mitigar el riesgo y mejorar la RI	Canalizaciones, cambio en la operación de bombas, diques, embalses, limpieza y/o mantenimiento de la infraestructura, PTAR, rehabilitación del SDU, sistemas de bombeo, Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS) y tanques de almacenamiento
Socio-Ecológicas	Estrategias no físicas que utilizan el conocimiento y participación de instituciones y usuarios del SDU o el aprovechamiento de servicios ecosistémicos para mitigar el riesgo y mejorar la RSE	Educación ambiental, incremento de la capacidad de dilución y asimilación de contaminantes en cuerpos receptores, minimización y prevención de aguas residuales, mejorar la coordinación institucional, normatividad, planeación urbana, reglamentación en los usos del suelo, reúso de aguas residuales, Sistemas de Alerta Temprana (SAT) y seguros

Fuente: Adaptado de Tucci (2007) y Butler *et al.* (2016)

2.6 SISTEMA DE DRENAJE URBANO RESILIENTE (SDUR)

En las últimas décadas, el principio fundamental de los SDU ha consistido en drenar lo más eficiente y rápido posible los caudales producidos en un área urbanizada, ya sea producto de actividades antrópicas o naturales (Fryd *et al.*, 2012; Zhou, 2014; Teshome y Devi, 2020). Por lo general, las áreas urbanas poseen un alto nivel de impermeabilidad, lo cual hace que los picos de caudales y volúmenes de escurrimiento que se generan sean relativamente altos y terminen rápidamente en el sistema de alcantarillado. Este principio, se ha convertido en un problema para la gestión de las aguas lluvias, ocasionando inundaciones cada vez con mayor frecuencia (Djordjević *et al.*, 2011).

Por otro lado, los cuerpos hídricos se ven afectados cuando son utilizados para la disposición de residuos sólidos, lo cual contribuye al deterioro de la calidad del agua y a la reducción de la capacidad hidráulica de canales y ríos y con ello a aumentar el riesgo. También la escorrentía urbana, asociada generalmente solo con problemas de cantidad, tiene un impacto importante en la calidad del recurso hídrico a través del efecto del primer lavado (*first flush*) (Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998), cuando se generan picos

de contaminación, en muchos casos con mayor impacto al generado por el aporte en el periodo seco de las aguas residuales (Sharma, 2008).

Los problemas de cantidad y calidad del agua, deben considerar amenazas emergentes como el cambio climático, el crecimiento poblacional y urbano, la falta de gobernanza y la gestión inadecuada de residuos sólidos, algunas de ellas con una gran incertidumbre asociada (Taleb, 2009), las cuales afectarán los niveles de servicio y harán necesarias inversiones en infraestructura cada vez más costosas. Para enfrentar estas amenazas, se debe planear, diseñar y construir SDUR, mejorando la capacidad de mantener su nivel de servicio y minimizar las consecuencias durante condiciones de falla (Mugume *et al.*, 2015b), donde la resiliencia en un SDUR se reconoce como fundamental para mantener y mejorar sus niveles de servicio, lo que contribuye a su sostenibilidad (Butler *et al.*, 2014; Butler *et al.*, 2016).

En este contexto, se reconoce la importancia de involucrar la resiliencia para garantizar la sostenibilidad de los SDU, siendo necesario cambiar de paradigma y reconocer que en las actuales circunstancias lo que se necesita es un SDUR que se adapte a condiciones ecológicas cambiantes que pueda recuperarse de las amenazas que aparezcan en el futuro (Scholz *et al.*, 2012; Walker y Salt, 2012). Así, la resiliencia se vincula de manera complementaria con la sostenibilidad, de tal modo que la resiliencia es un concepto clave para garantizar la sostenibilidad en un futuro impredecible (Blockley *et al.*, 2012; Pickett *et al.*, 2013).

Un SDUR, se relaciona con: i. *La magnitud de la amenaza que el SDU puede absorber y mantener dentro de un estado dado*; ii. *El grado con el cual el SDU es capaz de auto-organizarse*; y iii. *El grado con el cual el SDU puede construir capacidad de aprendizaje y adaptación* (Folke *et al.*, 2002).

Así, un SDUR es más capaz de absorber amenazas sin tener que cambiar de forma fundamental y cuando la transformación es inevitable, el SDUR contiene los componentes necesarios para renovarse y reorganizarse; es decir, puede afrontar, adaptarse o reorganizarse sin sacrificar la calidad del servicio. De esta manera, mejorar la resiliencia incrementa la capacidad para que los SDU puedan afrontar futuras amenazas en un mundo cambiante haciéndolos sostenibles (Walker y Salt, 2012).

Por lo anterior, un SDUR se puede definir como: “*Un conjunto de elementos, organizados y relacionados que interactúan entre sí con el objetivo de recolectar, transportar, tratar y disponer las aguas lluvias y residuales de las ciudades de manera sostenible, para mejorar la salud y bienestar de las personas y brindar protección de los cuerpos hídricos receptores de las descargas*” (Novotny, 2008; Woods *et al.*, 2015) y “*siendo resiliente a las amenazas, manteniendo su estructura y funciones básicas*” (Blackmore y Plant, 2008).

Un SDUR resiliente interactúa con la cuenca urbana y brinda principalmente servicios ecosistémicos de regulación de la contaminación del agua y de las inundaciones, brindando a los cuerpos hídricos protección de la contaminación y a las personas bienestar en términos de salud y seguridad y está inmerso en un contexto socioeconómico y político que influye en el cumplimiento de su objetivo (Butler y Davies, 2011; Woods *et al.*, 2015).

En la Figura 2.9 se representan los componentes de un SDUR y sus relaciones.

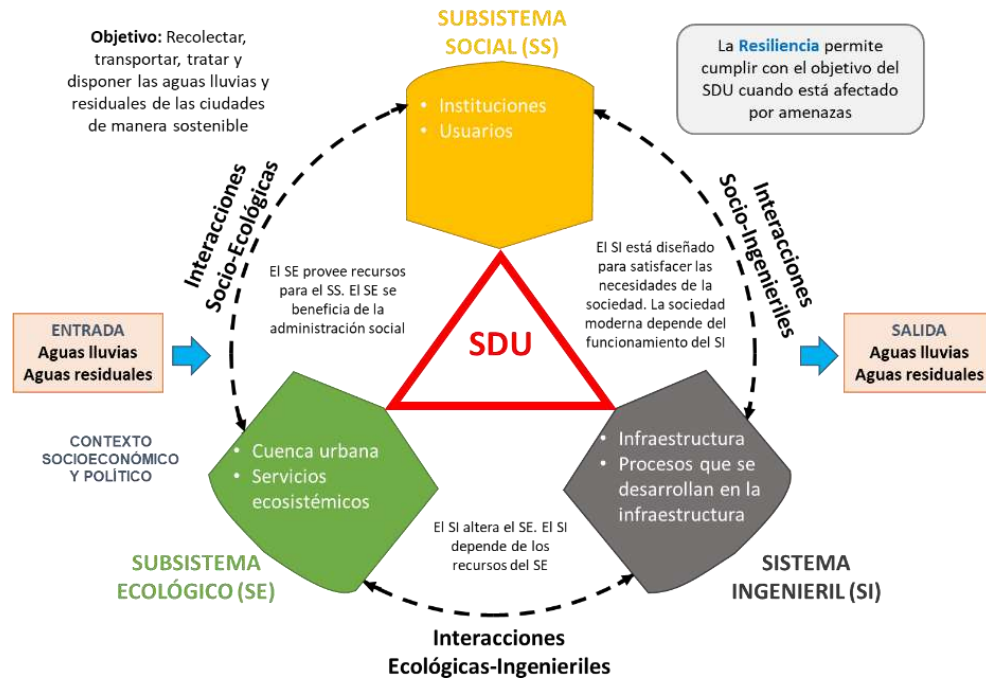


Figura 2.9 Descripción general de los componentes de un SDU y sus relaciones
Fuente: Adaptado de Butler y Davies (2011); Woods *et al.* (2015) y Markolf *et al.* (2018)

2.7 RESILIENCIA EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO

Al revisar 859 publicaciones relacionadas con la temática de resiliencia en SDU encontradas en las bases de datos bibliográficas Latindex, SciELO y Scopus y literatura gris en el periodo 1979-2021, se observa el creciente interés de la comunidad científica en la última década en el tema de resiliencia en SDU (Figura 2.10a), y se espera que esta tendencia se mantenga, dadas las amenazas futuras que deben afrontar los SDU.

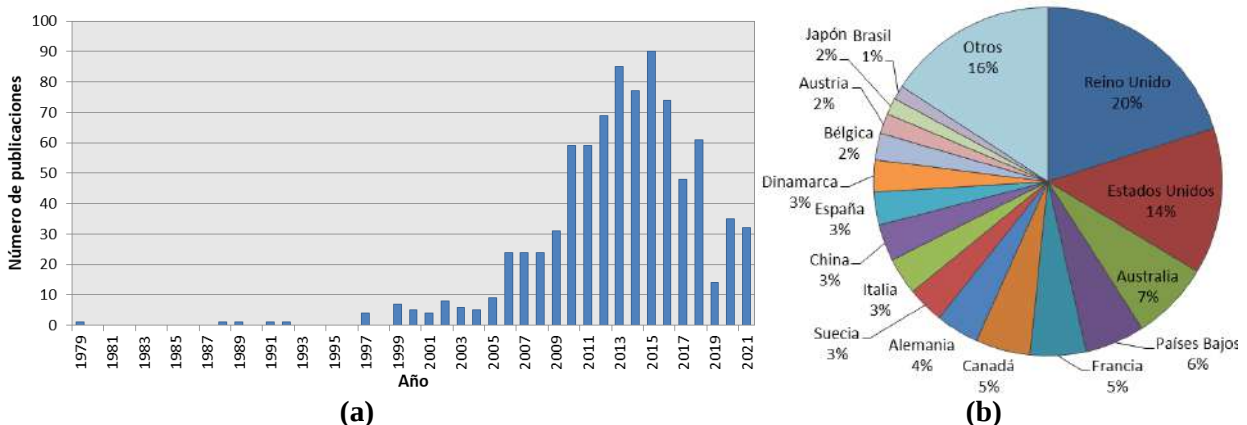


Figura 2.10 Publicaciones sobre resiliencia en SDU entre el periodo 1979-2021 (a) Número de publicaciones; y (b) Publicaciones por países

Adicionalmente, el mayor interés en la investigación de resiliencia en SDU (57% de las publicaciones) se ha enfocado en Reino Unido, Estados Unidos, Australia, Países Bajos, Francia y Canadá (Figura 2.10b); así mismo, es importante resaltar la escasa investigación realizada en Latinoamérica donde se destaca Brasil (1% de las publicaciones). De acuerdo con autores como Tucci (2001) y Parkinson y Mark

(2015), se espera para el futuro un mayor interés de investigación en el tema de resiliencia en SDU en los países en desarrollo dada la importancia de analizar el efecto de las amenazas emergentes que éstos deberán afrontar.

Con relación a las brechas de conocimiento sobre los modelos conceptuales reportados en la literatura, el análisis bibliométrico permitió identificar doce modelos conceptuales para analizar la resiliencia aplicables en SDU tanto desde el enfoque ingenieril como socio-ecológico, cinco asociados a la RI y siete asociados a la RSE como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Modelos conceptuales de análisis de resiliencia aplicables en SDU

Enfoque de resiliencia	Modelos conceptuales	Área de estudio	Evaluación del modelo	Uso del modelo	Fuente
RI	Safe, Sustainable and Resilient Approach	Agua urbana	Sin evaluar	Cuantificar la resiliencia	Butler <i>et al.</i> (2016)
	Sustainability of Urban Drainage Management	Drenaje urbano	SDU de la ciudad de Sanya, China		Ning <i>et al.</i> (2013)
	Global Resilience Analysis Approach		SDU de la cuenca del río Nakivubo, Kampala, Uganda	Cuantificar la resiliencia e incorporar estrategias	Mugume <i>et al.</i> (2015b)
	Resilience of Urban Drainage System in Adaptation to Climate Change		SDU del norte de Teherán, Irán		Binesh <i>et al.</i> (2018)
	Evaluación de la Redundancia en la Gestión de la Resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano		SDU de la cuenca del río Lili, Cali, Colombia		Domínguez (2018)
RSE	Adaptive Urban Planning and Design	Agua urbana	Sin evaluar	Cuantificar la resiliencia	Ahern <i>et al.</i> (2014)
	Socio-Ecological Index for Measuring Flood Resilience	Drenaje urbano	SDU del distrito de Edén, Ciudad del Cabo, Sudáfrica		Kotzee y Reyers (2016)
	Social-Ecological System Framework for Urban Stormwater Management		Sin evaluar		Flynn y Davidson (2016)
	Community Resilience to Flood Hazards		SDU de las ciudades de Charsadd, Nowshera y Peshawa, Provincia de Khyber Pukhthunkhwa, Pakistán		Qasim <i>et al.</i> (2016)
	Multi-criteria Approach for Assessing Urban Flood Resilience		SDU de la ciudad de Teherán, Irán		Moghadas <i>et al.</i> (2019)
	Framework to Evaluate Urban Flood Resilience		SDU de la cuenca del Canal do Mangue, Río de Janeiro, Brasil		Rezende <i>et al.</i> (2019b)
	Framework for Evaluating Policies to Improve Urban Flood Resilience		SDU del distrito de Raval, Barcelona, España	Cuantificar la resiliencia e incorporar estrategias	Hammond <i>et al.</i> (2018)

Como se muestra en la Tabla 2.4, son pocos y muy recientes los estudios que se han centrado en el desarrollo de modelos específicos para analizar la RI y RSE en SDU, además estos modelos descuidan las interacciones de la infraestructura del SDU con su entorno social y ecológico (García *et al.*, 2017) y su complementariedad. Esto es importante teniendo en cuenta que los problemas de RI surgen por una inadecuada gestión de la RSE, tal como lo sugieren Berkes *et al.* (2002) y Walker y Salt (2012); lo cual convierte al estudio de la resiliencia en esta área específica en un tema novedoso de investigación.

Otro aspecto identificado es que los modelos conceptuales se centran principalmente en cantidad de agua (inundaciones) descuidando el componente de calidad de agua (Beccari, 2016) debido a la complejidad de analizar este tipo de resiliencia por la información requerida y la dificultad de análisis (Ning *et al.*, 2013; Mugume *et al.*, 2015b; Butler *et al.*, 2016; Binesh *et al.*, 2018).

Al revisar la forma de evaluación de los modelos, se identificó que nueve de los doce modelos han sido evaluados en casos de estudio en SDU en los cuales se cuantificó la resiliencia y en algunos casos se incorporaron estrategias de mitigación, sin involucrar una evaluación del modelo más completa que considere la evaluación de la estructura y las relaciones representadas en él, la concordancia de las predicciones del modelo y los datos de un SDU real y la sensibilidad del modelo a cambios en los indicadores, la falta de una evaluación completa del modelo dificulta la estimación de su calidad (Beccari, 2016). Los tres modelos restantes, no fueron evaluados porque están formulados a nivel teórico, lo cual dificulta su evaluación en SDU (Ahern *et al.*, 2014; Butler *et al.*, 2016; Flynn y Davidson, 2016).

Adicionalmente, los modelos incluidos en la revisión de literatura comparten en su mayoría una limitación común que es la tendencia a centrarse en un tipo específico de amenaza externa y solo en algunos componentes de la RI o RSE sin tener en cuenta la visión amplia de este concepto. Un análisis integral de la resiliencia implica el estudio de aspectos ingenieriles y socio-ecológicos, la evaluación de posibles escenarios de amenaza y la formulación de estrategias de mitigación para mejorar la resiliencia (Folke, 2006b).

Otro aspecto a resaltar es que en algunos modelos de RSE faltan variables adecuadas para el análisis de RSE de SDU y además no es muy clara la relación entre factores, variables e indicadores para su análisis y contribución a la RSE.

De acuerdo con Folke (2006b), los modelos que no tienen en cuenta la RI y RSE conjuntamente no proporcionan una evaluación precisa de la misma, lo cual indica la necesidad que los nuevos modelos conceptuales aborden los dos enfoques de resiliencia con el mismo nivel de profundidad e importancia. Sin embargo, la formulación de este tipo de modelos es compleja debido a la naturaleza dinámica de la resiliencia, así como a las interacciones cruzadas entre los componentes de la resiliencia (Holling, 2001; Welsh, 2014; Mahmoud *et al.*, 2019).

Por lo tanto, se considera interesante desarrollar y evaluar nuevos modelos para medir la RI y RSE de los SDU integralmente, debido a que es una propiedad clave que se debe tener en cuenta para mejorar la sostenibilidad de estos sistemas.

2.8 BRECHAS DEL CONOCIMIENTO

De acuerdo con el análisis bibliométrico realizado se identificaron algunos aspectos relacionados con el análisis de resiliencia en SDU en los cuales se debe profundizar en la investigación como los siguientes:

- Los enfoques de RI y RSE de SDU se han estudiado de forma aislada y si bien en la literatura se han planteado diferentes modelos conceptuales para su análisis, los estudios en general se han centrado en el desarrollo de modelos específicos y no en el análisis integral de las mismas, lo que plantea la oportunidad de desarrollar nuevos modelos de análisis de la resiliencia aplicables a SDU, que idealmente incluyan estos dos enfoques para hacerlos sostenibles.
- Los modelos identificados en la Tabla 2.4, presentan dificultades para su aplicación en SDU porque algunos no han evaluado la estructura del modelo y las relaciones representadas en él, otros no han evaluado la concordancia de las predicciones del modelo y los datos de un SDU real y ninguno ha evaluado la sensibilidad del modelo a cambios en sus indicadores.
- Algunos de los modelos de RSE revisados no presentan variables adecuadas para el análisis de RSE en SDU y además no es clara la relación entre los factores, variables e indicadores para el análisis de RSE y su contribución a la RSE.
- Los modelos existentes comparten como limitación común que tienden a centrarse en amenazas externas, y solo en algunos componentes de la resiliencia sin tener en cuenta la visión amplia de

este concepto y además en su evaluación la mayoría no considera estrategias de mitigación para mejorar la resiliencia. Un análisis integral implica el estudio de aspectos ingenieriles y socio-ecológicos y la evaluación de diferentes tipos de amenazas y estrategias de mitigación del riesgo para mejorar la resiliencia.

- En países en desarrollo en general, debe promoverse más investigación en resiliencia en SDU para así ayudar a generar una mejor adaptación de estos sistemas a las amenazas emergentes.

De acuerdo con las brechas identificadas, en esta investigación doctoral se contribuyó con la siguiente brecha del conocimiento:

- Contribuir a mejorar la resiliencia y sostenibilidad de los SDU mediante la formulación de un modelo conceptual que permita analizar de manera integrada tanto la RI como la RSE por cantidad de agua (inundaciones) de un SDU, con énfasis en aspectos ingenieriles del desempeño del SDU y socio-ecológicos institucionales, de los usuarios, de la cuenca y el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones. El modelo conceptual propuesto se evaluó en un SDU correspondiente al Sistema de Drenaje Sur (SDS) de la ciudad de Cali para demostrar su validez y así facilitar su aplicación en otros SDU.

CAPÍTULO 3. IDENTIFICACIÓN DE FACTORES, VARIABLES E INDICADORES CLAVE DE RESILIENCIA EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO

3.1 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1.1 Aspectos conceptuales a considerar en la Resiliencia Ingenieril (RI) por cantidad

La RI se ha definido como: “*El grado en el cual el Sistema Ingenieril (SI) reduce la duración y magnitud de las fallas en el servicio durante su periodo de diseño cuando se somete a amenazas*” (Butler *et al.*, 2014; Butler *et al.*, 2016). En este sentido, la RI por cantidad en SDU se ha asociado al desempeño del SDU durante inundaciones, donde el grado de falla depende del cumplimiento de las funciones para los cuales se planifican, diseñan, construyen y operan los SDU.

De acuerdo con Bolinaga (1979) y Butler y Davies (2011), las funciones de un SDU son dos: *i. La función básica* que permite evitar al máximo posible los daños que las aguas lluvias puedan ocasionar a las personas y a las propiedades en la cuenca urbana. Esta función está asociada a Periodos de Retorno (TR) que generan un riesgo medio o alto (TR entre 10 y 100 años); y *ii. La función complementaria* que busca garantizar el normal desenvolvimiento de la vida diaria en las ciudades, permitiendo un apropiado tráfico de personas y vehículos durante la ocurrencia de precipitaciones. Esta función está asociada a TR que generan un riesgo bajo (TR entre 1 y 10 años).

Estas funciones están relacionadas a un nivel de inundación aceptable que se entiende como la altura máxima de agua permitida en las calles y avenidas, así como en las otras superficies urbanas, fijadas de acuerdo con la función establecida (Bolinaga, 1979; Butler y Davies, 2011). En consecuencia, existen básicamente dos niveles aceptables de inundación, uno correspondiente a la *función básica* y otro a la *complementaria*, siendo el riesgo en el primer caso mayor que en el segundo, por cuanto la protección de las personas y propiedades debe ser mayor que la garantía del tráfico de personas y vehículos.

Estos niveles de inundación se han definido con base en estudios de tipo costo-beneficio o multicriterio, los cuales se traducen en la fijación del TR. En este sentido, la elección del TR para la *función básica* depende del uso del suelo y el de la *función complementaria* depende del tipo de vía (Bolinaga, 1979; Parkinson y Mark, 2015).

Las Tablas 3.1 y 3.2 proporcionan los rangos de TR que se adoptan comúnmente para la *función básica* y *complementaria* según el uso del suelo y los tipos de vías respectivamente.

Tabla 3.1 Usos del suelo y TR de diseño de la función básica

Uso del suelo	TR (años)
Espacios públicos	2
Distritos residenciales suburbanos	5
Zonas residenciales de mayor densidad	10
Centros urbanos y distritos de alto valor	20
Áreas de alto riesgo	50

Fuente: Adaptado de Bolinaga (1979) y Parkinson y Mark (2015)

Tabla 3.2 Tipos de vías y TR de diseño de la función complementaria

Tipo de vía	TR (años)
Vías locales (avenidas y calles cuya importancia no traspasa la zona servida)	2
Vías distribuidoras (vías que distribuyen el tráfico proveniente de la vialidad arterial o que la alimentan)	5
Vías arteriales (autopistas urbanas y avenidas que garantizan la comunicación básica de la ciudad)	10
Vías especiales (acceso a instalaciones de seguridad nacional y servicios públicos vitales)	10

Fuente: Bolinaga (1979) y Parkinson y Mark (2015)

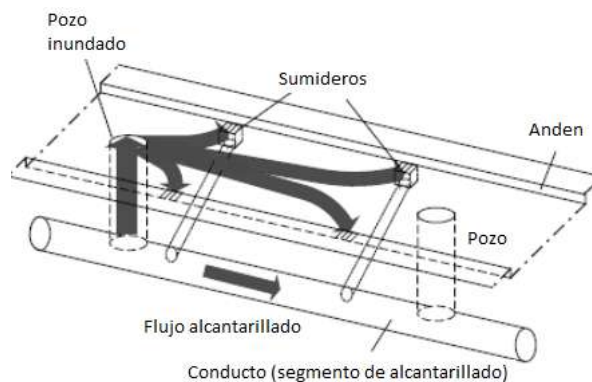
Los rangos para la *función complementaria* son un complemento de la *función básica*; es decir, una vez establecidos los TR de acuerdo a esta última, debe comprobarse si dentro de las diferentes áreas existen vías a las que les corresponden usos del suelo de la Tabla 3.1, y por lo tanto TR mayores, y si éste es el caso, se utilizarían estos últimos para la vía en cuestión (Bolinaga, 1979; Parkinson y Mark, 2015).

De acuerdo con Bolinaga (1979) y Butler y Davies (2011), en áreas urbanas para la función básica si se quieren evitar daños a las propiedades, no debe permitirse en principio que las aguas pasen sobre los andenes, lo cual limitaría la altura máxima de inundación en las calles y avenidas a 15 cm. Así mismo, en áreas verdes pueden admitirse, en muchos casos, alturas no mayores a los 20 cm, sin que ello cause problemas significativos. Al fijar esta altura máxima, se debe tener en cuenta que en vías especiales (acceso a instalaciones de seguridad nacional y servicios públicos vitales) nunca debe ser mayor que la necesaria para que un vehículo de emergencia pueda transitar, lo que la sitúa en un valor máximo de 5 cm.

Considerando las funciones de un SDU, se define una falla de un SDU por cantidad cuando: *Se desborda un nivel de lámina de agua mayor al establecido para las funciones básica y complementaria del SDU* (Bolinaga, 1979; Butler y Davies, 2011; Parkinson y Mark, 2015). El desbordamiento se produce cuando los canales y tuberías que están diseñados para funcionar a flujo libre se sobrecargan causando una inundación (Butler y Davies, 2011).

En este sentido, el SDU tendrán implícito dos tipos de falla: funcional y estructural; la primera se presenta cuando el SDU se desborda producto de la sobrecarga por incremento de los caudales (Ettrich *et al.*, 2005; Mugume *et al.*, 2015b) y la segunda es producida por daños en uno o varios de los elementos de la infraestructura del SDU (aliviaderos, bombas, canales, tanques o tuberías) generando una sobrecarga (Hernández, 2012; Mugume *et al.*, 2015b). Para estudiar estos dos tipos de falla se debe utilizar un modelo de simulación hidrodinámica que sea capaz de representar el desempeño del SDU (Mugume *et al.*, 2015b; Domínguez, 2018).

En la Figura 3.1 se presenta la forma como se genera una inundación por fallas del SDU.

**Figura 3.1 Generación de una inundación por fallas del SDU**

Fuente: Ettrich *et al.* (2005)

3.1.2 Aspectos conceptuales a considerar en la Resiliencia Socio-Ecológica (RSE) por cantidad

La RSE se define como: “*El potencial que tiene el Sistema Socio-Ecológico (SSE) de tolerar fallas, sin colapsar hacia un estado cualitativamente diferente manteniendo su estructura y funciones, lo cual involucra la capacidad del mismo para adaptarse siguiendo cambios impulsados por amenazas*” (Walker *et al.*, 2004; Blackmore y Plant, 2008). En este sentido la RSE por cantidad en SDU se asocia a los aspectos que permiten al SSE adaptarse a las inundaciones por fallas del SI.

Desde el enfoque de RSE, la capacidad de adaptación del SSE a las fallas dependerá de la forma en que el subsistema social (instituciones y usuarios) se prepare para las amenazas, a los niveles de desarrollo que haya alcanzado el subsistema social para reducir la vulnerabilidad (Escalante y Basurto, 2014; Zúñiga, 2018), a la capacidad de la cuenca urbana de adaptarse y a la capacidad del SDU de mantener la provisión de servicios ecosistémicos durante las fallas (Novotny, 2008; Niemelä *et al.*, 2011; Grabowski *et al.*, 2017; Moores *et al.*, 2017).

En este contexto, en la literatura se indica que la RSE por cantidad de un SDU debe considerar aspectos sociales como: *gobernanza, riesgo de inundación, residuos sólidos en el SDU y desarrollo económico de la población*, y aspectos ecológicos como: *características físicas de la cuenca urbana* y el servicio ecosistémico de *regulación de inundaciones* que brinda el SDU.

A continuación, se presenta la importancia para la RSE por cantidad de cada uno de estos aspectos:

- **Gobernanza:** Se relaciona en parte con el nivel de coordinación institucional entre diferentes entidades con intereses en el drenaje urbano. En este sentido, las áreas de drenaje no están delimitadas por los límites administrativos locales y las obras de protección de inundaciones y drenaje de aguas lluvias son parte de una cuenca que es más grande que el área de una ciudad, por lo cual existen diferentes instituciones que gobiernan una cuenca (Miguez *et al.*, 2007). La falta de planificación y gestión urbanas eficaces debido a deficiencias en los sistemas administrativos de planificación y control urbanos de las instituciones es un problema generalizado que afecta la gobernanza de los SDU (Parkinson y Mark, 2015).

La falta de *gobernanza* también se ve reflejada en los asentamientos informales que se desarrollan en la cuenca sin planeación y generalmente de forma ilegal. Los asentamientos informales por lo general presentan un conjunto de problemas de drenaje por la falta de infraestructura para drenar las aguas lluvias y residuales (Woolf *et al.*, 2016). A lo anterior, se suma la necesidad de prevenir desarrollos en áreas identificadas como particularmente propensas a inundaciones causadas por escorrentías elevadas. De acuerdo con Cullivan *et al.* (1988) y Parkinson y Mark (2015), estudiar la gobernanza es un aspecto muy importante en los SDU principalmente de las ciudades de países en desarrollo porque a menudo estos se caracterizan por un bajo nivel de coordinación institucional y una gran proporción de asentamientos informales.

- **Riesgo de inundación:** Es común principalmente en países en desarrollo, que las áreas de riesgo alto de inundación de canales y ríos estén ocupadas por población de bajos ingresos económicos sin ninguna protección (Maksimovic *et al.*, 1993; Gomes *et al.*, 2012). En estas situaciones, las viviendas se construyen sin tener en cuenta el drenaje de aguas lluvias y cuando las viviendas ocupan llanuras aluviales o áreas de drenaje naturales, los problemas de drenaje aumentan debido a la capacidad restringida del flujo (Tucci, 2007). Esta condición hace que los canales y ríos de los SDU requieran obras de control de inundaciones costosas, lo cual es un problema para la RSE de los SDU.
- **Residuos sólidos en el SDU:** Los residuos sólidos (basuras, escombros y sedimentos) dispuestos inadecuadamente en canales y ríos causan obstrucciones y reducen la capacidad hidráulica de los mismos debido a la disminución del área de la sección transversal (Hall, 1984; Geoffrey y

Vickridge, 1997). Parkinson y Mark (2015) y Mohammadiun *et al.* (2019) indican que es más probable que se produzcan inundaciones prematuras si los residuos sólidos se acumulan y bloquean los canales y ríos que conforman los SDU generando en consecuencia que gran parte de la infraestructura de drenaje urbano no funcione con la eficiencia que debería.

- *Desarrollo económico de la población:* El desarrollo económico de la población influye en la capacidad de los usuarios de recuperarse de las inundaciones. Es importante considerar este desarrollo porque las poblaciones en condición de pobreza tienen una RSE baja cuando ocurren daños y pérdidas económicas producto de las inundaciones (Cutter *et al.*, 2008; Kotzee y Reyers, 2016).
- *Características físicas de la cuenca urbana:* Características físicas como la pendiente y la permeabilidad de la cuenca urbana influyen en la capacidad de esta para mantener su estructura durante las inundaciones; dependiendo de las características físicas de la cuenca urbana el SDU puede tener una RSE mayor o menor a las inundaciones (Escalante y Basurto, 2014; Zúñiga, 2018).
- *Regulación de inundaciones:* El SDU permite regular las inundaciones de forma natural mediante el almacenamiento e infiltración de la escorrentía en áreas verdes (bosques, jardines, parques y separadores viales) y cuerpos hídricos (humedales, lagunas, ríos y pantanos) (Kotzee y Reyers, 2016; Teshome y Devi, 2020).

3.2 METODOLOGÍA

Los factores, variables e indicadores clave que tienen relevancia en la resiliencia por cantidad de SDU se identificaron mediante un análisis bibliométrico considerando las palabras clave: “*Modelo Conceptual*”, “*Sostenibilidad*”, “*Resiliencia*”, “*Resiliencia Ingenieril*”, “*Resiliencia Socio-Ecológica*”, “*Sistema Socio-Ecológico*”, “*Servicios Ecosistémicos*” y “*Drenaje Urbano*” y considerando las metodologías propuestas por Gómez *et al.* (2014) y López *et al.* (2016) para la revisión y gestión de información de temas científicos, las cuales consideran cuatro fases para su desarrollo: definición del problema, búsqueda de información, organización de la información y análisis de la información.

Inicialmente, para la definición del problema, a partir de las palabras clave definidas para el análisis bibliométrico, se elaboraron las siguientes ecuaciones de búsqueda: “*Conceptual Framework AND Resilience OR Engineering Resilience OR Socio-Ecological Resilience*”, “*Conceptual Framework AND Socio-Ecological System*”, “*Conceptual Framework AND Urban Drainage*”, “*Sustainability AND Socio-Ecological System*”, “*Sustainability AND Urban Drainage*”, “*Socio-Ecological System AND Resilience OR Engineering Resilience OR Socio-Ecological Resilience*”, “*Urban Drainage AND Resilience OR Engineering Resilience OR Socio-Ecological Resilience*”, “*Socio-Ecological System AND Ecosystem Services*” y “*Ecosystem Services AND Urban Drainage*”. Para la búsqueda de información se utilizaron las bases de datos bibliográficas Latindex, SciELO y Scopus con el fin de tener una visión internacional incluida la latinoamericana, en un periodo de observación desde 1979, año en que el concepto de resiliencia se empezó a involucrar en el campo de la ingeniería (Starr, 1979), hasta diciembre de 2021, obteniéndose así un total de 859 artículos.

Para la organización de la información y selección de los artículos más relevantes, se empleó la herramienta de gestión de información en temas científicos y minería de datos RefVizTM desarrollada por Thomson ResearchSoft, la cual emplea algoritmos matemáticos para agrupar los artículos por temáticas en función de las palabras clave (Glassman, 2005; Agrawal, 2006), con la que se elaboró un mapa de ideas denominado galaxia, que agrupa cada tema en función de la frecuencia de las palabras clave (Agrawal, 2006). En este caso, la organización de información, eliminando duplicidades, mostró 634 artículos de interés.

En la Figura 3.2 se presentan los grupos de interés en las temáticas consultadas.

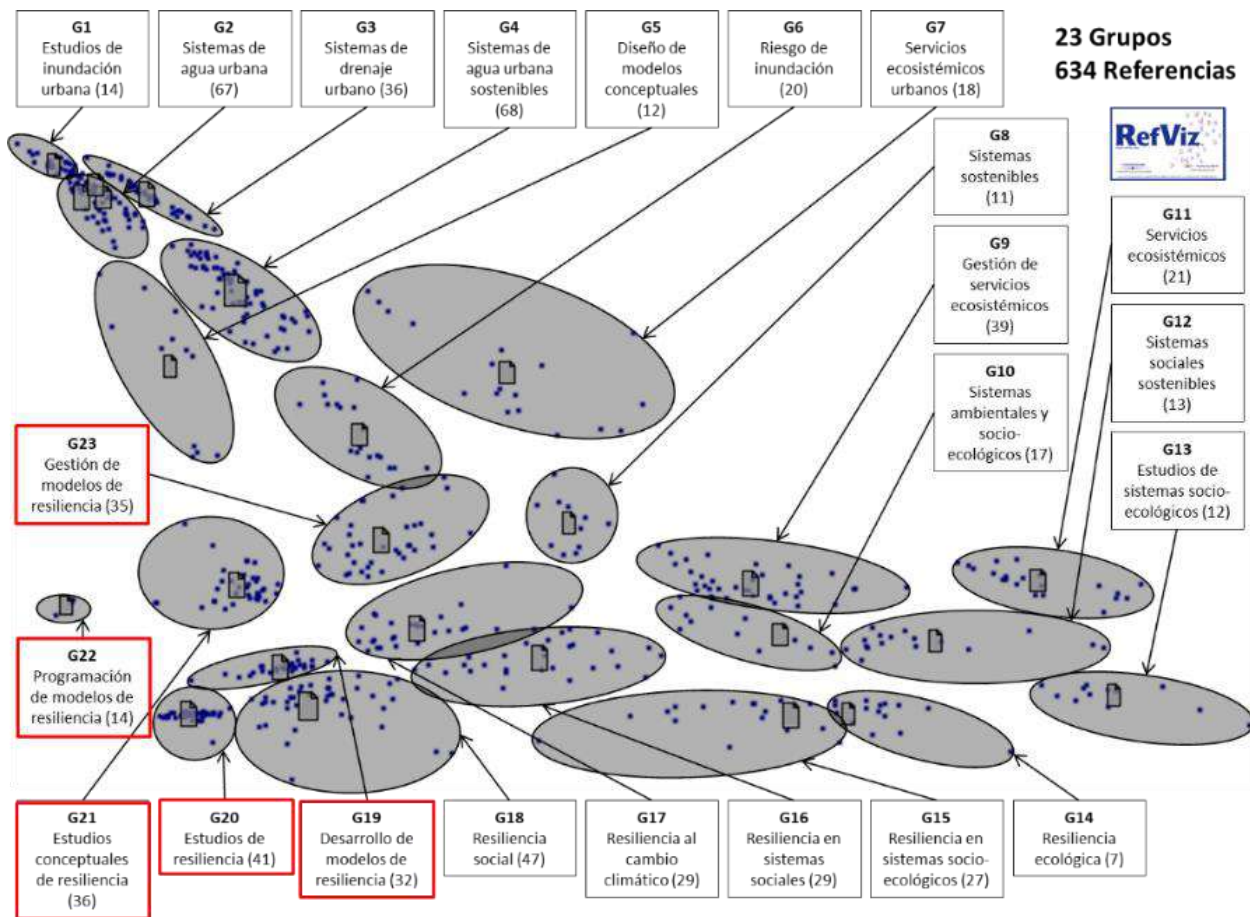


Figura 3.2 Grupos de interés en las temáticas consultadas (1979-2021)

Con la información organizada, se seleccionaron los documentos y autores a revisar mediante la lectura de los resúmenes y conclusiones de dichos artículos. De los 23 grupos conformados en la etapa de búsqueda de información y por su relación con el tema de modelos de resiliencia, se seleccionaron cinco como los de mayor interés (grupos G19, G20, G21, G22 y G23) los cuales incluyeron 158 artículos. Los documentos filtrados fueron estudiados con mayor detalle, para de esta manera seleccionar los de verdadera relevancia para la investigación, excluyendo artículos no relevantes basados en la lectura de resúmenes y conclusiones.

Adicionalmente, se incluyeron artículos relevantes no encontrados en las bases de datos consultadas y documentos de literatura gris (trabajos de grado de pregrado y maestría y tesis doctorales). De este modo, se obtuvo un total de 50 documentos de mayor interés sobre resiliencia en SDU con los cuales se realizó la identificación de factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU; para su selección, se desarrolló un análisis del porcentaje de citación de éstos en los documentos estudiados, los cuales fueron analizados para entender su incidencia en la RI y RSE, definirlos conceptualmente, establecer su interrelación y clasificarlos de acuerdo con la RI y RSE.

En la selección de indicadores clave de resiliencia en SDU se consideraron además los siguientes criterios propuestos por Balaei *et al.* (2018): *i.* Confiabilidad, demuestra si el indicador se puede utilizar a largo plazo; *ii.* Disponibilidad, representa la facilidad de obtener datos a partir de registros administrativos; *iii.* Sensibilidad, determina si el indicador es sensible o no a cambios en el resultado; *iv.* Simplicidad, representa la facilidad de análisis por parte de los usuarios del modelo; y *v.* Relevancia, determina si el indicador es adecuado para el componente de resiliencia objetivo.

El análisis bibliométrico se complementó con discusiones específicas mediante reuniones, mesas de trabajo en grupo y entrevistas abiertas con expertos nacionales e internacionales en drenaje urbano y resiliencia, y profesionales de instituciones del sector agua y saneamiento para mejorar la conceptualización de los factores, variables e indicadores identificados. Finalmente, con los resultados tanto del análisis bibliométrico como de las discusiones, se elaboró una tabla que relaciona los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU y sus definiciones.

La Tabla 3.3 presenta el listado de las discusiones que permitieron analizar la importancia de los factores, variables e indicadores identificados para la resiliencia de SDU y mejorar su conceptualización, mientras que en la Figura 3.3 se muestran fotografías que evidencian las actividades desarrolladas en las discusiones.

Tabla 3.3 Discusiones desarrolladas para mejorar la conceptualización de los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU

Tipo de discusión	Nombre, fecha y lugar de la discusión	Actividades desarrolladas
Reuniones grupo de trabajo	Reuniones con miembros de los grupos ECCA y GIRH de la Universidad del Valle, Enero de 2016 a Diciembre de 2019, Cali, Colombia	- Exposición de conceptos, factores, variables e indicadores - Reuniones internas del proyecto de resiliencia de COLCIENCIAS
Ponencia nacional en ACODAL 2016	Título de la ponencia: Aplicabilidad de los conceptos sostenibilidad, resiliencia y sistemas socio-ecológicos para la gestión sostenible del agua urbana. En: 1er Seminario Internacional Centros Urbanos Sostenibles y Resilientes: Desarrollo Urbano en Tecnologías de Agua y Saneamiento, Construcción, Energía y Movilidad, Octubre 26-28 de 2016, Cali, Colombia	- Exposición de conceptos, factores, variables e indicadores - Entrevista abierta con un (1) experto nacional en resiliencia
Ponencia nacional en Agua 2016	Título de la ponencia: Factores de resiliencia para la gestión sostenible del agua urbana. En: Agua 2016. Seminario Internacional: Gestión del uso eficiente y ahorro del agua para la sostenibilidad del recurso hídrico, Noviembre 8-11 de 2016, Cali, Colombia	- Exposición de conceptos, factores, variables e indicadores - Entrevista abierta con un (1) experto nacional en drenaje urbano
Ponencia nacional en UNIVALLE 2018	Título de la ponencia: Aplicación de un indicador para el análisis de la resiliencia ingenieril por inundaciones de un sistema de drenaje urbano. En: X Simposio de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Mayo 7 de 2018, Cali, Colombia	- Exposición de conceptos, factores, variables e indicadores - Entrevista abierta con un (1) experto nacional en drenaje urbano
Ponencia internacional en ICUD 2017	Título de la ponencia: A conceptual framework for resilience analysis of urban drainage systems. En: 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage, Septiembre 10-15 de 2017, Praga, República Checa	- Exposición de conceptos, factores, variables e indicadores - Entrevista abierta con un (1) experto internacional en drenaje urbano y resiliencia
Taller en el Club Piedra Linda de Cali 2017	Seminario Taller: El Sistema de Drenaje Sur del Municipio de Cali: En la búsqueda de estrategias para una gestión sostenible y resiliente, Mayo 26 de 2017, Cali, Colombia	- Exposición de conceptos, factores, variables e indicadores - Mesas de trabajo con actores clave de instituciones del sector agua y saneamiento de la ciudad de Cali (Contraloría, CVC, DAGMA, DAPM, EMCALI y UAESP)
Taller en el Hotel NH de Cali 2019	Taller: Presentación de resultados del proyecto de resiliencia de COLCIENCIAS, Octubre 24 de 2019, Cali, Colombia	- Exposición de conceptos, factores, variables e indicadores - Mesas de trabajo con actores clave de instituciones del sector agua y saneamiento de la ciudad de Cali (Contraloría, CVC, DAGMA, DAPM, EMCALI y UAESP)
Pasantía internacional en el instituto IFAK de Alemania	Pasantía internacional, Instituto IFAK de Alemania, Septiembre 16 a Diciembre 5 de 2017, Magdeburgo, Alemania	- Exposición de conceptos, factores, variables e indicadores - Reuniones con el asesor internacional e investigadores del grupo Agua & Energía



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.3 Fotografías de las actividades realizadas en las discusiones (a) Reuniones grupo de trabajo proyecto de resiliencia de COLCIENCIAS; (b) Ponencia nacional ACODAL 2016 – Cali, Colombia; (c) Ponencia internacional ICUD 2017 – Praga, República Checa; (d) Taller Club Piedra Linda – Cali, Colombia; (e) Taller Hotel NH – Cali, Colombia; y (f) Pasantía instituto IFAK – Magdeburgo, Alemania

En la Figura 3.4 se sintetiza la metodología empleada para identificar y conceptualizar los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU.

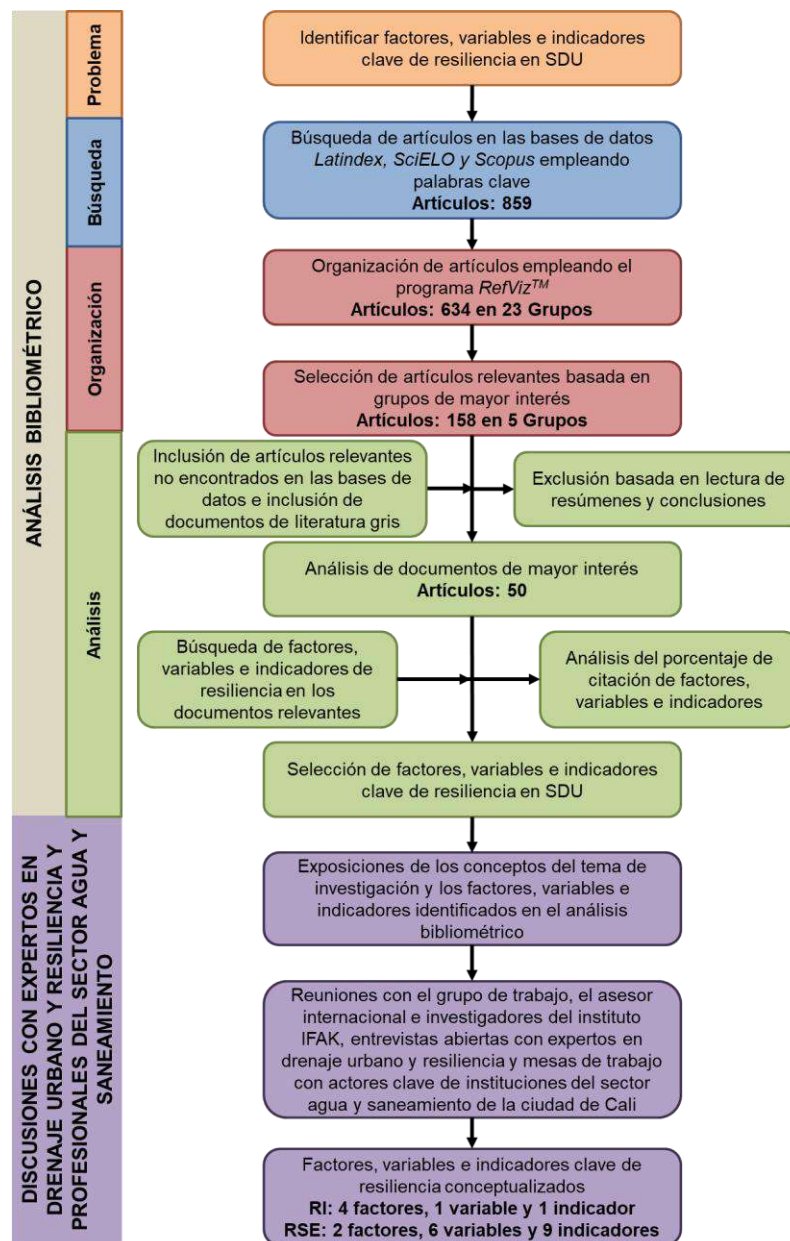


Figura 3.4 Metodología empleada para identificar y conceptualizar los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Factores clave de resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano (SDU)

Se identificó que la RI involucra cuatro factores: *i. Flexibilidad* (capacidad de cambio); *ii. Recursividad* (capacidad de movilizar recursos); *iii. Redundancia* (presencia de opciones); y *iv. Robustez* (capacidad de resistir) (Bruneau y Reinhorn, 2007; da Silva *et al.*, 2012; Pandit, 2014); mientras que la RSE involucra dos factores: *i. Social* (instituciones y usuarios); y *ii. Ecológico* (cuenca urbana y servicios ecosistémicos) (Novotny, 2008; Niemelä *et al.*, 2011; Grabowski *et al.*, 2017; Moores *et al.*, 2017).

En la Tabla 3.4 se presenta cómo han sido considerados estos factores por los diferentes autores consultados.

Tabla 3.4 Factores considerados en diferentes estudios de resiliencia en SDU

Enfoque de resiliencia	Factores	Fuente	Porcentaje de autores que citan el factor
RI	Flexibilidad	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 16, 17	14
	Recursividad	1, 4, 10, 15, 17	6
	Redundancia	1, 4, 7, 9, 11, 13, 14	8
	Robustez	1, 4, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 16, 17	11
RSE	Social	18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50	30
	Ecológico	18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 50	31

Fuente: 1. (Liu y Song, 2020); 2. (Liang *et al.*, 2020); 3. (Russo *et al.*, 2020); 4. (Wang *et al.*, 2019a); 5. (Lee y Kim, 2019); 6. (Bertilsson *et al.*, 2019); 7. (Domínguez, 2018); 8. (Lee *et al.*, 2017); 9. (Dong *et al.*, 2017); 10. (Irwin *et al.*, 2016); 11. (Butler *et al.*, 2016); 12. (Tahmasebi y Yazdandoost, 2015); 13. (Mugume *et al.*, 2015b); 14. (Lhomme *et al.*, 2013); 15. (Gay y Sinha, 2013); 16. (Ning *et al.*, 2013); 17. (Wang y Blackmore, 2009); 18. (Prouty *et al.*, 2020); 19. (McClymont *et al.*, 2020); 20. (Barreiro *et al.*, 2020); 21. (Oladokun y Montz, 2019); 22. (Vercruysse *et al.*, 2019); 23. (Shakou *et al.*, 2019); 24. (Rezende *et al.*, 2019a); 25. (Fenner *et al.*, 2019); 26. (Rezende *et al.*, 2019b); 27. (Moghadas *et al.*, 2019); 28. (Mahmoud *et al.*, 2019); 29. (Makropoulos *et al.*, 2018); 30. (Tahmasebi Birgani y Yazdandoost, 2018); 31. (Markolf *et al.*, 2018); 32. (Hammond *et al.*, 2018); 33. (Adedeji *et al.*, 2018); 34. (Xu y Kajikawa, 2017); 35. (Moore *et al.*, 2017); 36. (Dhar y Khirfan, 2017); 37. (Qasim *et al.*, 2016); 38. (Woolf *et al.*, 2016); 39. (Kotzee y Reyers, 2016); 40. (Flynn y Davidson, 2016); 41. (Moore y Semadeni-Davies, 2015); 42. (Ahern *et al.*, 2014); 43. (McGinnis y Ostrom, 2014); 44. (Moore *et al.*, 2013); 45. (Balsells *et al.*, 2013); 46. (Arner, 2013); 47. (Schelfaut *et al.*, 2011); 48. (Chen *et al.*, 2011); 49. (Asah, 2008); 50. (De Bruijn, 2004)

Con relación a la RI, el factor más citado es la *flexibilidad* debido a que en principio este factor se asociaba directamente al concepto de RI, lo cual ha ido cambiando con la incorporación de factores adicionales. Este factor evalúa la capacidad de recuperación de la infraestructura del SDU y está asociado con la duración de las fallas (Bruneau y Reinhorn, 2007; da Silva *et al.*, 2012).

La *recursividad* evalúa la disponibilidad de recursos económicos y humanos y está asociada a la capacidad de movilizar estos recursos durante las fallas (Bruneau y Reinhorn, 2007; Pandit, 2014). De los cuatro factores de RI, éste es el factor menos citado debido al desconocimiento de su forma de análisis y a su reciente incorporación en la RI de SDU (Wang *et al.*, 2019a; Liu y Song, 2020).

La *redundancia* evalúa la multiplicidad de elementos que permiten que las funciones del SDU continúen y está asociada con la disponibilidad de elementos redundantes que realizan estas funciones (Pandit, 2014; Mugume *et al.*, 2015b), éste factor se ha citado poco en la RI debido en parte al desconocimiento de su forma de análisis y también a su reciente incorporación en la RI de SDU (Butler *et al.*, 2014; Mugume *et al.*, 2015a).

La *robustez* evalúa la resistencia que tiene la infraestructura del SDU durante las fallas garantizando que funcione bien incluso en condiciones de incertidumbre y está asociada con la magnitud de las fallas (Pandit, 2014). Este es el segundo factor de RI más citado, debido a que inicialmente también se asociaba directamente al concepto de RI.

Con relación a la RSE, el factor *social* se ha citado con la misma frecuencia que el *ecológico*. El factor *social* evalúa la capacidad que tienen las instituciones y usuarios del SDU de afrontar las fallas (Moore y Semadeni-Davies, 2015; Grabowski *et al.*, 2017), y está asociado a las características de las instituciones y usuarios que permiten afrontar estas fallas (Escalante y Basurto, 2014).

El factor *ecológico* evalúa la capacidad de la cuenca urbana de mantener su estructura y del SDU de mantener los servicios ecosistémicos durante las fallas (Novotny, 2008; Niemelä *et al.*, 2011; Grabowski *et al.*, 2017), y está asociado a las características físicas de la cuenca urbana y los servicios ecosistémicos que brinda el SDU.

Al revisar los factores de RI se identificó que la *redundancia* y la *recursividad* están fuertemente interrelacionadas y es a través de ellos que se pueden mejorar la *flexibilidad* y la *robustez*. Cambios en la *redundancia* y en la *recursividad* reducen la duración y magnitud de las fallas, mejorando de esta manera la *flexibilidad* y *robustez*.

Es recomendable ver la *robustez* y la *flexibilidad* como factores que se desean tener para lograr que un SDU tenga una adecuada RI, y la *redundancia* y la *recursividad* como los medios para alcanzar estas

metas. Por lo tanto, la *recursividad* y la *redundancia* son factores que ayudan a la *flexibilidad* y la *robustez*; es decir, entre más recursivo y redundante sea el Sistema Ingenieril (SI), éste es más flexible y robusto. Adicionalmente, a diferencia de la *flexibilidad* y *robustez*, la *recursividad* y *redundancia* requieren al menos de un segundo escenario que incluya estrategias de mitigación para poder ser calculados.

Al revisar los factores de RSE se encontró que éstos involucran múltiples variables cualitativas y cuantitativas provenientes de diferentes ámbitos ambientales, económicos e institucionales, las cuales se interrelacionan mediante un índice compuesto que las agrupa (Bosher *et al.*, 2009; Cutter *et al.*, 2010; Qasim *et al.*, 2016). Dado que los factores de RI son diferentes a los de RSE en sus características e interrelaciones, estos factores en general se han analizado de forma aislada. Las diferencias entre la RI y la RSE hacen que su análisis se aborde de forma distinta para los dos tipos de enfoque (Quinlan *et al.*, 2016).

En la Tabla 3.5 se sintetiza la descripción de cada uno de los factores de resiliencia en SDU y sus estrategias de mitigación.

Tabla 3.5 Características de los factores clave de resiliencia en SDU y sus estrategias de mitigación

Enfoque de resiliencia	Factores	Descripción	Estrategias de mitigación	Ejemplos de estrategias
RI	Flexibilidad	Capacidad de la infraestructura de cambiar, reorganizarse o adaptarse durante las fallas	Incrementa a través de estrategias ingenieriles que incluyan el uso de sistemas distribuidos espacialmente (descentralizados) o sistemas modulares	Embalses, sistemas de bombeo, Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS) y tanques de almacenamiento
	Recursividad	Capacidad de la infraestructura de visualizar y actuar para identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos durante las fallas	Aumenta mediante la incorporación de estrategias ingenieriles de movilización de recursos económicos y humanos atendiendo prioridades y estableciendo metas	Cambio en la operación de bombas, limpieza y/o mantenimiento de la infraestructura, rehabilitación del sistema
	Redundancia	Capacidad de la infraestructura de disponer de elementos o sistemas pasivos que son sustituibles y pueden activarse durante las fallas	Mejora mediante la incorporación de estrategias ingenieriles de adición de múltiples elementos, componentes u operaciones que hacen posible desviar condiciones excepcionales de sobrecarga del sistema a partes alternativas	Embalses, sistemas de bombeo, SUDS y tanques de almacenamiento
	Robustez	Capacidad de la infraestructura de mantener un desempeño aceptable durante las fallas	Incrementa a través de la incorporación de estrategias ingenieriles que mejoran el desempeño de la infraestructura mediante la reducción de las incertidumbres	Canalizaciones, diques, embalses, limpieza y/o mantenimiento de la infraestructura, rehabilitación del sistema, sistemas de bombeo, SUDS y tanques de almacenamiento
RSE	Social	Capacidad de las instituciones y usuarios de afrontar las fallas	Mejora mediante la implementación de estrategias socio-ecológicas que utilizan el conocimiento y participación de las instituciones y los usuarios para reducir el riesgo a las fallas	Educación ambiental, mejorar la coordinación institucional, normatividad, planeación urbana, reglamentación en los usos del suelo, Sistemas de Alerta Temprana (SAT) y seguros
	Ecológico	Capacidad de la cuenca urbana de mantener su estructura y del SDU de mantener los servicios ecosistémicos durante las fallas	Mejora mediante la implementación de estrategias socio-ecológicas que aprovechan los servicios ecosistémicos para reducir el riesgo a las fallas	Almacenamiento del agua en cuerpos hídricos y almacenamiento e infiltración de la escorrentía en áreas verdes

3.3.2 Variables e indicadores clave de resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano (SDU)

Se identificó que la RI involucra una variable: *i. Desempeño del SDU*; mientras que la RSE involucra seis variables: *i. Gobernanza*; *ii. Riesgo de inundación*, *iii. Residuos sólidos en el SDU*; *iv. Desarrollo económico de la población*; *v. Características físicas de la cuenca urbana*; y *vi. Regulación de inundaciones*.

En la Tabla 3.6 se presenta cómo han sido consideradas estas variables y sus respectivos indicadores por los diferentes autores consultados.

Tabla 3.6 Variables e indicadores considerados en diferentes estudios de resiliencia en SDU

Factores	Variables	Indicadores	Fuente	Porcentaje de autores que citan el indicador
Flexibilidad Recursividad Redundancia Robustez	Desempeño del SDU	RI por Inundaciones	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	15
Social	Gobernanza	Nivel de coordinación institucional	21, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 37, 38, 42, 43, 47, 49	13
		Porcentaje de asentamientos informales	19, 21, 24, 26, 27, 28, 34, 37, 38, 41, 43, 46	11
	Riesgo de inundación	Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	19, 21, 22, 24, 27, 29, 30, 40, 46, 47, 50	10
	Residuos sólidos en el SDU	Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	20, 27, 28, 48	4
	Desarrollo económico de la población	Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	18, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 33, 37, 43,	9
Ecológico	Características físicas de la cuenca urbana	Pendiente predominante del terreno en porcentaje	18, 32, 39, 40, 42, 44, 48	6
		Porcentaje de área impermeable	23, 28, 32, 35, 39, 41	5
	Regulación de inundaciones	Porcentaje de áreas verdes	18, 21, 22, 25, 26, 28, 31, 32, 33, 36, 38, 39, 42, 45, 49, 50	14
		Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	18, 19, 21, 22, 25, 26, 31, 32, 33, 36, 39, 45, 49, 50	13

Fuente: 1. (Liu y Song, 2020); 2. (Liang *et al.*, 2020); 3. (Russo *et al.*, 2020); 4. (Wang *et al.*, 2019a); 5. (Lee y Kim, 2019); 6. (Bertilsson *et al.*, 2019); 7. (Domínguez, 2018); 8. (Lee *et al.*, 2017); 9. (Dong *et al.*, 2017); 10. (Irwin *et al.*, 2016); 11. (Butler *et al.*, 2016); 12. (Tahmasebi y Yazdandoost, 2015); 13. (Mugume *et al.*, 2015b); 14. (Lhomme *et al.*, 2013); 15. (Gay y Sinha, 2013); 16. (Ning *et al.*, 2013); 17. (Wang y Blackmore, 2009); 18. (Prouty *et al.*, 2020); 19. (McClymont *et al.*, 2020); 20. (Barreiro *et al.*, 2020); 21. (Oladokun y Montz, 2019); 22. (Vercruysse *et al.*, 2019); 23. (Shakou *et al.*, 2019); 24. (Rezende *et al.*, 2019a); 25. (Fenner *et al.*, 2019); 26. (Rezende *et al.*, 2019b); 27. (Moghadas *et al.*, 2019); 28. (Mahmoud *et al.*, 2019); 29. (Makropoulos *et al.*, 2018); 30. (Tahmasebi Birgani y Yazdandoost, 2018); 31. (Markolf *et al.*, 2018); 32. (Hammond *et al.*, 2018); 33. (Adedeji *et al.*, 2018); 34. (Xu y Kajikawa, 2017); 35. (Moores *et al.*, 2017); 36. (Dhar y Khirfan, 2017); 37. (Qasim *et al.*, 2016); 38. (Woolf *et al.*, 2016); 39. (Kotzee y Reyers, 2016); 40. (Flynn y Davidson, 2016); 41. (Moores y Semadeni-Davies, 2015); 42. (Ahern *et al.*, 2014); 43. (McGinnis y Ostrom, 2014); 44. (Moores *et al.*, 2013); 45. (Balsells *et al.*, 2013); 46. (Arner, 2013); 47. (Schelfaut *et al.*, 2011); 48. (Chen *et al.*, 2011); 49. (Asah, 2008); 50. (De Bruijn, 2004)

La RI tiene como variable principal el *desempeño del SDU*, esta permite cuantificar la falla del SDU durante eventos de lluvia (Mugume *et al.*, 2015b). Se identificó como indicador clave de esta variable la *RI por Inundaciones*, el cual se calcula simulando hidrodinámicamente en el SDU eventos de lluvia asociados a un TR según las funciones básica y complementaria del drenaje urbano (Ning *et al.*, 2013; Mugume *et al.*, 2015b; Butler *et al.*, 2016; Binesh *et al.*, 2018; Domínguez, 2018).

Por su parte, la RSE tiene como variables más citadas la *regulación de inundaciones*, la *gobernanza* y las *características físicas de la cuenca urbana*, esto se debe a que la mayoría de publicaciones de resiliencia en SDU coinciden en que frecuentemente los problemas que afectan la RSE de un SDU están asociados con una inadecuada gestión de estas variables (Kotzee y Reyers, 2016; Qasim *et al.*, 2016; Hammond *et al.*, 2018; Moghadas *et al.*, 2019; Rezende *et al.*, 2019b).

Las variables de RSE menos citadas son *riesgo de inundación*, *desarrollo económico de la población* y *residuos sólidos en el SDU*. Esto obedece a que la mayoría de publicaciones de resiliencia en SDU se han realizado en países desarrollados donde es menos frecuente que se presenten fallas en los SDU asociadas a variables sociales. Sin embargo, en países en desarrollo los problemas críticos de los SDU están asociados generalmente con estas variables de RSE sociales (Parkinson y Mark, 2015), pues se interceptan con aspectos de carácter institucional y comunitario.

A continuación se definen los indicadores asociados a cada variable de RSE:

- *Gobernanza*: Incluye dos indicadores el *nivel de coordinación institucional* y el *porcentaje de asentamientos informales*. El primero establece el grado de coordinación entre diferentes entidades con intereses en el drenaje urbano, mientras que el segundo se relaciona con los asentamientos que se desarrollan en la cuenca urbana sin planeación y generalmente de forma ilegal.
- *Riesgo de inundación*: Tiene como indicador asociado el *porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación* (Kotzee y Reyers, 2016; Qasim *et al.*, 2016; Moghadas *et al.*, 2019; Rezende *et al.*, 2019b). Este indicador se obtiene mediante la relación entre el área de zonas de riesgo alto de inundación en la cuenca urbana y el área de la cuenca urbana.
- *Residuos sólidos en el SDU*: Tiene como indicador el *porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos* (Moghadas *et al.*, 2019). Este indicador se obtiene mediante la relación entre el volumen promedio anual de residuos sólidos retirados de canales y ríos (capacidad hidráulica de funcionamiento) y el volumen útil de canales y ríos (capacidad hidráulica de diseño).
- *Desarrollo económico de la población*: Presenta como indicador el *porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)*. Este indicador define una serie de necesidades básicas fundamentales como vivienda, educación, salud y servicios públicos de agua y saneamiento, en las cuales los hogares que no alcancen a suplir una de estas necesidades son considerados como pobres (CEPAL, 2001).
- *Características físicas de la cuenca urbana*: Incluye dos indicadores la *pendiente predominante del terreno en porcentaje* y el *porcentaje de área impermeable* (Escalante y Basurto, 2014; Zúñiga, 2018). El primer indicador se obtiene calculando de la topografía de la cuenca urbana la pendiente promedio. El segundo indicador se obtiene ponderando la permeabilidad del suelo de acuerdo al área de la cuenca urbana.
- *Regulación de inundaciones*: Incluye dos indicadores el *porcentaje de áreas verdes* y el *porcentaje de área de cuerpos hídricos*. El primer indicador se mide empleando la relación entre áreas verdes y el área de la cuenca urbana. El segundo indicador se mide empleando la relación entre el área de cuerpos hídricos y el área de la cuenca urbana.

Es importante resaltar que el indicador de *RI por Inundaciones* considera información de los indicadores de RSE: *porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos*, *pendiente predominante del terreno en porcentaje*, *porcentaje de área impermeable*, *porcentaje de áreas verdes* y *porcentaje de áreas de cuerpos hídricos*, para la simulación hidrodinámica del SDU. Por lo tanto, existe una correlación que hace posible que cambios en estos indicadores de RSE cause aumento o disminución de la RI.

Los factores, variables e indicadores se pueden agrupar para que sus dimensiones coincidan con los enfoques de la resiliencia. En este sentido en la Tabla 3.7 y en la Figura 3.5 se presentan los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU, asociados a la RI y RSE y los indicadores que están correlacionados.

Tabla 3.7 Factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU

Enfoque de resiliencia	Factores	Variables	Indicadores
RI	Flexibilidad Recursividad Redundancia Robustez	1. Desempeño del SDU. Evalúa el desempeño del SDU durante eventos de inundación. Esta variable se calcula simulando hidrodinámicamente en el SDU eventos de lluvia asociados a un TR según las funciones básica y complementaria del drenaje urbano.	1.1. RI por inundaciones $RI = \frac{1}{t_r - t_{fs}} \int_{t_{fs}}^{t_r} D(t) dt$ RI es la Resiliencia Ingenieril por inundaciones, $D(t)$ es la función de desempeño por inundaciones, t_r es el tiempo de recuperación y t_{fs} es el tiempo de inicio de la falla
RSE	Social	2. Gobernanza. Se relaciona con el nivel de coordinación institucional entre diferentes entidades con intereses en el drenaje urbano y también con los asentamientos informales que pueden tener un conjunto distinto de problemas de drenaje y una falta total de infraestructura para drenar las aguas lluvias y residuales.	2.1. Nivel de coordinación institucional • Alto: Alta coordinación institucional • Medio: Mediana coordinación institucional • Bajo: Baja coordinación institucional 2.2. Porcentaje de asentamientos informales AI (%) = # Viviendas informales/ # Total de viviendas
		3. Riesgo de inundación. Hace referencia al área en riesgo alto de inundación de la cuenca urbana. Esto es importante porque pueden existir áreas de riesgo alto de inundación de canales y ríos ocupadas por población sin ninguna protección.	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación AZRAI (%) = Área en zona de riesgo alto de inundación/ Área de la cuenca urbana
		4. Residuos sólidos en el SDU. Está asociada a la cantidad de residuos sólidos (basuras, escombros y sedimentos) dispuestos en canales y ríos los cuales causan obstrucciones generando inundaciones.	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos RS (%) = Volumen promedio anual de residuos sólidos retirados de canales y ríos/ Volumen útil de canales y ríos
	Ecológico	5. Desarrollo económico de la población. Evalúa la condición económica de la población, en este sentido las poblaciones con mejores condiciones económicas tienen una mejor RSE pudiéndose recuperar más rápidamente de los daños y pérdidas económicas producto de las inundaciones.	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) NBI (%) = # Hogares sin satisfacer una de las NBI/ # Total de hogares
		6. Características físicas de la cuenca urbana. Evalúa las características físicas de la cuenca urbana que influyen en la capacidad de mantener su estructura durante las inundaciones. Estas características son importantes para establecer la RSE de la cuenca urbana a las inundaciones.	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje PT (%) = Inclinación promedio del terreno 6.2. Porcentaje de área impermeable AI (%) = Porcentaje de área impermeable en la cuenca urbana
		7. Regulación de inundaciones. Está relacionada con el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones que brinda el SDU. En este sentido, el SDU permite regular las inundaciones de forma natural mediante el almacenamiento e infiltración de la escorrentía en áreas verdes (bosques, jardines, parques y separadores viales) y cuerpos hídricos (humedales, lagunas, pantanos y ríos).	7.1. Porcentaje de áreas verdes AV (%) = Áreas verdes/ Área de la cuenca urbana 7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos ACH (%) = Área de cuerpos hídricos/ Área de la cuenca urbana

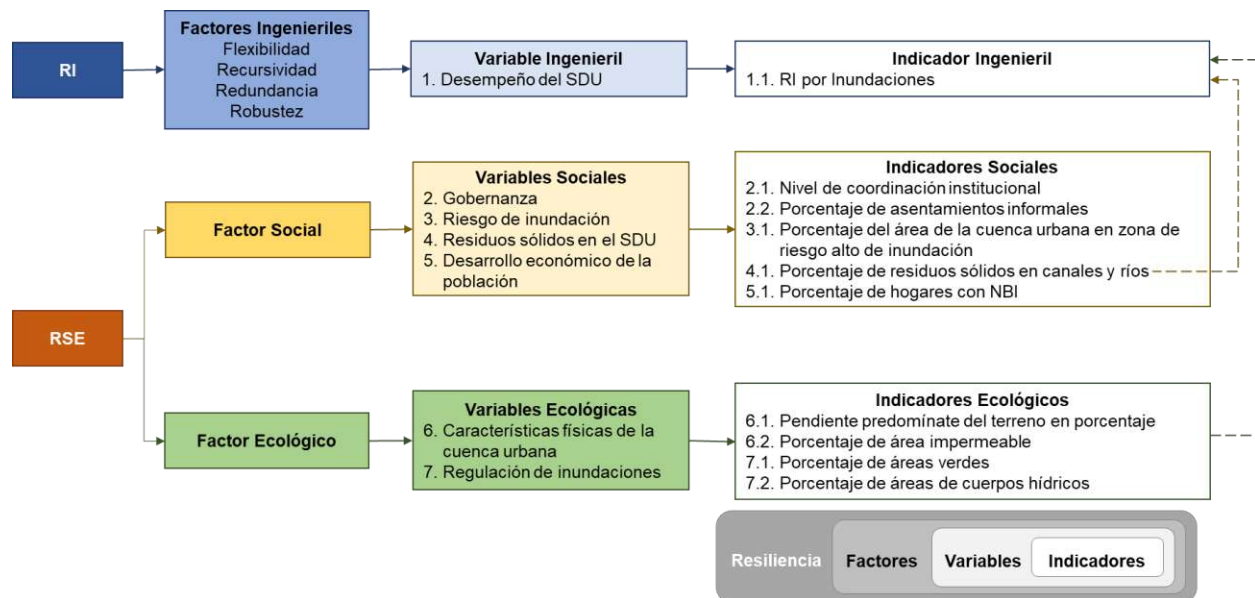


Figura 3.5 Agrupación de factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU

3.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3

Se identificaron y conceptualizaron los factores clave para el análisis de la RI y RSE por cantidad en SDU. En el caso de la RI fueron: *flexibilidad*, *recursividad*, *redundancia* y *robustez*, los cuales evalúan la capacidad de cambio, movilización de recursos, presencia de opciones y capacidad de resistencia, respectivamente; los factores de RI más citados fueron la *flexibilidad* y *robustez*, mientras que la *recursividad* y *redundancia* han sido menos citados debido al desconocimiento de su forma de análisis y a su reciente incorporación en la RI de SDU. La *recursividad* y *redundancia* están fuertemente interrelacionadas; cambios en los mismos, afectan la duración y magnitud de las fallas bajo un escenario en el cual se incluyen, ayudando a la *flexibilidad* y *robustez* y mejorando de esta manera la RI.

En el caso de la RSE, los factores identificados fueron: *social* y *ecológico*, cuya relación se da a través de las variables e indicadores que los conforman en un índice compuesto que las agrupa. Estos factores consideran la forma en que el SSE está expuesto a las fallas y la incidencia que tiene el subsistema social (instituciones y usuarios) en la cuenca urbana alterando sus dinámicas lo cual modifica su RSE. Estos factores han sido citados con la misma frecuencia y de forma complementaria.

En general, los factores de RI son diferentes a los de RSE en sus características e interrelaciones, por lo cual se han analizado de forma aislada. Las diferencias entre la RI y la RSE hacen que su análisis se aborde de forma distinta para los dos tipos de enfoque.

Para el análisis de la RI en SDU se identificó que la variable principal es la de *desempeño del SDU*, debido a que permite evaluar adecuadamente las fallas de los SDU por inundaciones mediante simulación hidrodinámica de eventos de lluvia asociados a un TR. Para la RSE se identificaron y conceptualizaron las siguientes variables: *gobernanza*, *características físicas de la cuenca urbana*, *regulación de inundaciones*, *riesgo de inundación*, *residuos sólidos en el SDU* y *desarrollo económico de la población*, siendo las tres primeras las más citadas debido a que la mayoría de autores consultados coinciden en que los problemas que afectan la RSE de un SDU a las inundaciones se asocian a la inadecuada gestión de las mismas.

Las variables menos citadas en la RSE fueron *riesgo de inundación*, *residuos sólidos en el SDU* y *desarrollo económico de la población*, debido a que la mayoría de publicaciones de resiliencia en SDU se han realizado en países desarrollados donde no es común que la RSE esté influenciada por las mismas. Sin embargo, estas variables son de mayor importancia y complejidad en contextos urbanos de países en

desarrollo, puesto que los problemas críticos que afectan la RSE de los SDU de estos países están generalmente asociados con estas variables que se interceptan con aspectos de carácter institucional y comunitario. Para cuantificar las variables de resiliencia en SDU, se presentaron sus correspondientes indicadores.

Existe una correlación entre el indicador de *RI por Inundaciones* con los indicadores de RSE: *porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos, pendiente predominante del terreno en porcentaje, porcentaje de área impermeable, porcentaje de áreas verdes y porcentaje de áreas de cuerpos hídricos*, que hace posible que cambios en estos indicadores de RSE cause aumento o disminución de la RI.

Los factores, variables e indicadores de resiliencia en SDU identificados en este estudio son útiles para el análisis integral de resiliencia en SDU, contribuyendo de esta manera a llenar un vacío existente en la investigación relacionada con la falta de factores, variables e indicadores adecuados para analizar la resiliencia de estos sistemas, principalmente considerando la relación entre ellos y su contribución tanto a la RI como a la RSE.

CAPÍTULO 4. FORMULACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO

4.1 REVISIÓN DE LITERATURA

4.1.1 Modelos conceptuales de resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano (SDU)

A partir de un análisis bibliométrico en las bases de datos bibliográficas Latindex, SciELO y Scopus y literatura gris en el periodo 1979-2021 y siguiendo las metodologías propuestas por Gómez *et al.* (2014) y López *et al.* (2016), se identificaron doce modelos conceptuales para analizar la resiliencia aplicables en SDU, cinco asociados a la Resiliencia Ingenieril (RI) y siete asociados a la Resiliencia Socio-Ecológica (RSE), no se encontraron publicaciones que combinen ambos enfoques de resiliencia. Estos modelos se revisaron y compararon con el objetivo de formular el modelo conceptual para el análisis de Resiliencia Integral (IR) en SDU (combinación de RI y RSE).

Se identificó que seis modelos (50%) tienen una estructura cíclica (Ning *et al.*, 2013; Ahern *et al.*, 2014; Butler *et al.*, 2016; Flynn y Davidson, 2016; Domínguez, 2018; Hammond *et al.*, 2018), cuatro (33%) tienen una estructura lineal (Kotzee y Reyers, 2016; Binesh *et al.*, 2018; Moghadas *et al.*, 2019; Rezende *et al.*, 2019b) y dos (17%) no desarrollan una estructura para realizar el análisis de resiliencia, considerándose únicamente los resultados de los valores de resiliencia (Mugume *et al.*, 2015b; Qasim *et al.*, 2016). En los modelos de estructura cíclica una vez termina el análisis de resiliencia, inicia un nuevo ciclo que considera cambios en el SDU; por el contrario, en los de estructura lineal el análisis de resiliencia finaliza cuando se determina su valor.

En estos modelos conceptuales se observa que en general, el análisis de resiliencia se realiza mediante los siguientes bloques temáticos: *i. Definición de los elementos físicos, instituciones y usuarios presentes en el SDU; ii. Formulación de escenarios de amenaza posibles que puedan generar una falla en el SDU; iii. Análisis de la resiliencia del SDU; y iv. Estrategias de mitigación.* Es importante destacar que los bloques normalmente están conectados secuencialmente, de tal manera que los resultados de un bloque sirven como datos de entrada del bloque siguiente.

Respecto a la forma de visualización de resultados, casi todos los modelos proporcionaron alguna forma para su visualización: dos (17%) mostraron sus resultados mediante tablas (Ning *et al.*, 2013; Qasim *et al.*, 2016), cuatro (33%) mediante gráficas (Mugume *et al.*, 2015b; Binesh *et al.*, 2018; Domínguez, 2018; Hammond *et al.*, 2018), tres (25%) proporcionaron una visualización interactiva de los resultados mediante mapas (Kotzee y Reyers, 2016; Moghadas *et al.*, 2019; Rezende *et al.*, 2019b) y tres (25%) no visualizan resultados porque están formulados a nivel teórico y no se evaluaron (Ahern *et al.*, 2014; Butler *et al.*, 2016; Flynn y Davidson, 2016).

En general los modelos de RI emplean una curva de desempeño para cuantificar la RI mediante simulación hidrodinámica del desempeño del SDU utilizado para las simulaciones el modelo de gestión de aguas lluvias – *Storm Water Management Model* (SWMM), mientras que los modelos de RSE utilizan un índice compuesto que agrega los factores, variables e indicadores de RSE.

En la Tabla 4.1 se presenta las características de los modelos conceptuales identificados de análisis de resiliencia aplicables en SDU.

Tabla 4.1 Características de los modelos conceptuales de resiliencia aplicables en SDU

Enfoque de resiliencia	Modelos conceptuales	Estructura del modelo			Visualización de resultados			Análisis		Fuente de datos		Índice compuesto de RSE										Área de estudio	Evaluación del modelo	Área de la cuenca (km²)	Fuente					
		Cíclica	Lineal	Sin estructura	Tablas	Gráficas	Mapas	Sin visualización	Curva de desempeño	Índice compuesto	Eventos de lluvia	Sin medición	Registros administrativos	Encuestas	Sin medición	Categorización de escalas	División por 100	Re-escalamiento	Sin normalizar	ACP	Consulta expertos					Pesos proporcionales	Sin ponderar	AHP	WSM	Sin agregar
RI	Safe, Sustainable and Resilient Approach	✓						✓	✓		✓															Agua urbana	Sin evaluar	-	Butler <i>et al.</i> (2016)	
	Sustainability of Urban Drainage Management	✓			✓				✓		✓															Drenaje urbano	SDU de la ciudad de Sanya, China	1920	Ning <i>et al.</i> (2013)	
	Global Resilience Analysis Approach			✓		✓			✓		✓																SDU de la cuenca del río Nakivubo, Kampala, Uganda	27,93	Mugume <i>et al.</i> (2015b)	
	Resilience of Urban Drainage System in Adaptation to Climate Change		✓			✓			✓		✓																SDU del norte de Teherán, Irán	142,63	Binesh <i>et al.</i> (2018)	
	Evaluación de la Redundancia en la Gestión de la Resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano	✓				✓			✓		✓																	SDU de la cuenca del río Lili, Cali, Colombia	16	Domínguez (2018)
RSE	Adaptive Urban Planning and Design	✓						✓		✓				✓					✓				✓		✓	Agua urbana	Sin evaluar	-	Ahern <i>et al.</i> (2014)	
	Socio-Ecological Index for Measuring Flood Resilience		✓					✓		✓			✓					✓		✓				✓		Drenaje urbano	SDU del distrito de Edén, Ciudad del Cabo, Sudáfrica	2400	Kotzee y Reyers (2016)	

Tabla 4.1. Características de los modelos conceptuales de resiliencia aplicables en SDU (cont.)

Enfoque de resiliencia	Modelos conceptuales	Estructura del modelo			Visualización de resultados			Análisis		Fuente de datos		Índice compuesto de RSE														Área de estudio	Evaluación del modelo	Área de la cuenca (km²)	Fuente				
		Cíclica	Lineal	Sin estructura	Tablas	Gráficas	Mapas	Sin visualización	Curva de desempeño	Índice compuesto	Eventos de lluvia	Sin medición	Registros administrativos	Encuestas	Sin medición	Normalización				Ponderación				Agregación									
																División por 100	Re-escalamiento	Sin normalizar	ACP	Consulta expertos	Pesos proporcionales	Sin ponderar	AHP	WSM	Sin agregar								
RSE	Social-Ecological System Framework for Urban Stormwater Management	✓						✓		✓					✓				✓				✓				✓	Drenaje urbano	Sin evaluar	-	Flynn y Davidson (2016)		
	Community Resilience to Flood Hazards			✓	✓					✓				✓		✓					✓			✓					SDU de las ciudades de Charsadd (1), Nowshera (2) y Peshawa (3), Provincia de Khyber Pukhthunkhwa, Pakistán	996 (1) 1748 (2) 1257 (3)	Qasim <i>et al.</i> (2016)		
	Multi-criteria Approach for Assessing Urban Flood Resilience		✓					✓		✓			✓			✓				✓		✓							SDU de la ciudad de Teherán, Irán	686	Moghadas <i>et al.</i> (2019)		
	Framework to Evaluate Urban Flood Resilience		✓					✓		✓			✓				✓			✓		✓							SDU de la cuenca del Canal do Mangue, Río de Janeiro, Brasil	45	Rezende <i>et al.</i> (2019b)		
	Framework for Evaluating Policies to Improve Urban Flood Resilience	✓					✓			✓			✓					✓		✓		✓			✓					SDU del distrito de Raval, Barcelona, España	4,37	Hammond <i>et al.</i> (2018)	
	Total/Modelos		6/12	4/12	2/12	2/12	4/12	3/12	3/12	5/5	7/7	4/5	1/5	4/7	1/7	2/7	1/7	1/7	2/7	3/7	1/7	1/7	3/7	2/7	1/7	4/7	2/7						
	(%)	50	33	17	17	33	25	25	100	100	80	20	57	14	29	14	14	29	43	14	14	43	29	14	57	29							

Al comparar la fuente de datos empleada para los indicadores, cuatro modelos de RI (80%) requieren como datos de entrada eventos de lluvia para cuantificar la RI (Ning *et al.*, 2013; Mugume *et al.*, 2015b; Binesh *et al.*, 2018; Domínguez, 2018) y un modelo de RI (20%) no emplea medición de datos porque está formulado a nivel teórico y no se evaluó (Butler *et al.*, 2016). Por su parte, cuatro modelos de RSE (57%) obtienen los datos para los indicadores de registros administrativos de agencias nacionales de estadística, autoridades locales y otras organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (Kotzee y Reyers, 2016; Hammond *et al.*, 2018; Moghadas *et al.*, 2019; Rezende *et al.*, 2019b), uno (14%) recopila los datos mediante encuestas (Qasim *et al.*, 2016) y dos (29%) no emplean mediciones de datos para los indicadores porque están formulados a nivel teórico y no se evaluaron (Ahern *et al.*, 2014; Butler *et al.*, 2016; Flynn y Davidson, 2016).

Con relación a la forma de normalización de indicadores para la formulación del índice compuesto de RSE, proceso que se emplea para facilitar la comparación posible entre unidades de análisis, se evidenció que un modelo de RSE (14%) empleó el método de categorización de escalas (Qasim *et al.*, 2016); otro (14%) empleó el método de división por 100 (Moghadas *et al.*, 2019); dos (17%) coincidieron al utilizar el método de re-escalamiento (Kotzee y Reyers, 2016; Hammond *et al.*, 2018); y tres (67%) no normalizan los indicadores, ya sea porque los datos ya eran consistentes o porque no era relevante para el método de análisis de RSE.

En la Tabla 4.2 se detallan los métodos de normalización de indicadores considerados en los modelos conceptuales de RSE.

Tabla 4.2 Métodos de normalización de indicadores considerados en los modelos conceptuales de RSE

Método	Descripción	Ecuación
Categorización de escalas	En este caso, a cada indicador se le asigna un rango de categorías, por ejemplo: alto, medio o bajo, o se establece una categoría: sí o no. A cada categoría se le asigna un rango de valores dentro del cual esta es válida en un intervalo [0, 1]	Esta técnica es útil para representar información cualitativa en rangos cuantificables
División por 100	Los indicadores que se encuentran en porcentaje se dividen por 100 para poderlos normalizar en un intervalo [0, 1]	$y_t^i = \frac{x_t^i}{100}$
Re-escalamiento	En este caso se considera el rango de los valores que el indicador adquiere. Consiste en transformar los indicadores para llevarlos al intervalo [0, 1], empleando la distancia entre los valores máximos y mínimos que el indicador adquiere considerando todos los datos del indicador conjuntamente	$y_t^i = \frac{x_t^i - \min(x_t^i)}{\max(x_t^i) - \min(x_t^i)}$

Nota: x_t^i es el valor del indicador i en el tiempo t y y_t^i es el valor normalizado del indicador i .

Fuente: OECD (2008) y Schuschny y Soto (2009)

Por otro lado, al comparar el método de ponderación de factores, variables e indicadores para la formulación del índice compuesto de RSE, se identificó que un modelo de RSE (14%) emplea el método de Análisis de Componentes Principales (ACP) (Kotzee y Reyers, 2016); otro (14%) emplea el método de consulta a expertos (Moghadas *et al.*, 2019), tres (43%) emplean el método de pesos proporcionales (Qasim *et al.*, 2016; Hammond *et al.*, 2018; Rezende *et al.*, 2019b) y dos no realizan ponderación (29%) porque están formulados a nivel teórico y no se evaluaron (Ahern *et al.*, 2014; Flynn y Davidson, 2016).

En la Tabla 4.3 se describen los métodos de ponderación considerados en los modelos conceptuales de RSE.

Tabla 4.3 Métodos de ponderación considerados en los modelos conceptuales de RSE

Método	Descripción
ACP	Consiste en explicar la mayor parte de la variabilidad total observada en un conjunto de factores, variables e indicadores con el menor número de componentes posibles. Esto se logra transformando este conjunto de factores, variables e indicadores originales que generalmente tienen correlación entre sí, en otro conjunto no correlacionado, denominado componentes principales, relacionados con las primeras a través de una transformación lineal, y que están ordenados de acuerdo con el porcentaje de variabilidad total que explican. Se escoge de entre los componentes principales a los que explican la mayor variabilidad acumulada, reduciendo así la dimensión total del conjunto de información (Schuschny y Soto, 2009)
Consulta a expertos	Consiste en consultar a expertos de distintas procedencias y con diferentes intereses, que contribuyen con su conocimiento, a identificar la importancia relativa de cada factor, variable e indicador en el agregado total, priorizando algunos de estos por sobre otros (Sackman, 1974)
Pesos proporcionales	Consiste en distribuir el peso de los factores, variables e indicadores de manera proporcional de acuerdo con su cantidad, considerando que la suma de pesos de las variables pertenecientes a un mismo factor debe ser igual al peso del factor y la suma de pesos de los indicadores pertenecientes a una misma variable debe ser igual al peso de la variable (Schuschny y Soto, 2009)

Respecto a la forma de agregación de factores, variables e indicadores en un índice compuesto de RSE, se identificó que un modelo de RSE (14%) emplea el Proceso de Análisis Jerárquico – *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (Moghadas *et al.*, 2019); cuatro (57%) emplean el Método de Suma Ponderada – *Weighted Sum Method* (WSM) (Kotzee y Reyers, 2016; Qasim *et al.*, 2016; Hammond *et al.*, 2018; Rezende *et al.*, 2019b) y dos no realizan agregación (29%) porque están formulados a nivel teórico y no se evaluaron (Ahern *et al.*, 2014; Flynn y Davidson, 2016).

En la Tabla 4.4 se describen los métodos de agregación de factores, variables e indicadores considerados en los modelos conceptuales de RSE.

Tabla 4.4 Métodos de agregación de factores, variables e indicadores considerados en los modelos conceptuales de RSE

Método	Descripción
AHP	Consiste en un proceso interactivo en el que se identifican todos los elementos que intervienen en el proceso de toma de decisiones, para luego ordenarlos en niveles que describan la problemática (Saaty, 1980)
WSM	Consiste en agregar los indicadores en un subíndice como la sumatoria del valor de cada indicador normalizado por su peso (Schuschny y Soto, 2009)

Con relación a la evaluación de los modelos, nueve (75%) han sido evaluados a través de casos de estudio en SDU y tres (25%) no fueron evaluados porque están formulados a nivel teórico (Ahern *et al.*, 2014; Butler *et al.*, 2016; Flynn y Davidson, 2016).

Respecto a las áreas de las cuencas se identificó que un modelo se evaluó en un área pequeña 4,37 km² (Hammond *et al.*, 2018), tres se evaluaron en áreas medianas entre 16 a 45 km² (Mugume *et al.*, 2015b; Domínguez, 2018; Rezende *et al.*, 2019b) y cinco se evaluaron en áreas grandes entre 143 a 2400 km² (Ning *et al.*, 2013; Kotzee y Reyers, 2016; Qasim *et al.*, 2016; Binesh *et al.*, 2018; Moghadas *et al.*, 2019). Un aspecto a resaltar es que la mayoría de modelos de RSE se evaluaron en cuencas con áreas medianas o grandes (mayores a 10 km²), esto obedece a que la información para cuantificar las variables de RSE generalmente se obtienen con mejor detalle a estas escalas.

4.1.2 Modelo Storm Water Management Model (SWMM)

El modelo SWMM es un modelo de simulación hidrodinámica unidimensional (1D) de tipo determinístico, desarrollado por la *United States Environmental Protection Agency* (USEPA). Este modelo

puede aplicarse de modo continuo o por eventos, para simular fenómenos de lluvia-escorrentía, transito de caudales y cargas contaminantes a través del SDU en áreas principalmente urbanas (Rossman, 2015).

El modelo SWMM permite simular los componentes de cantidad y calidad de la hidrología urbana de alcantarillados combinados y separados, incluyendo el escurrimiento superficial, el transporte a través del SDU, el almacenamiento, el tratamiento y los SUDS (Niazi *et al.*, 2017). Según Concha (2007), los principales bloques de cálculo (rutinas) que conforman el modelo son: RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN y STORAGE/TREATMENT.

El bloque RUNOFF simula la generación de escorrentía superficial y de contaminantes sobre la cuenca en estudio debido a la precipitación. Sus resultados son los hidrogramas de escurrimiento superficial para cada una de las áreas de drenaje definidas en la esquematización.

TRANSPORT, transita caudales y cargas contaminantes a través de la red de alcantarillado. Este bloque simula el régimen de flujo no permanente usando la aproximación de onda cinemática.

EXTRAN, transita caudales (pero no las cargas contaminantes) a través de la red de alcantarillado, resolviendo las ecuaciones completas de régimen no permanente unidimensional (1D) (ecuaciones de Saint-Venant). El bloque EXTRAN permite representar los efectos de remanso, sobrecarga y estructuras especiales como vertederos, orificios, bombas y compuertas.

STORAGE/TREATMEN, transita caudales y cargas contaminantes en depósitos de almacenamiento o unidades de tratamiento.

4.1.3 Análisis de la resiliencia por cantidad en Sistemas de Drenaje Urbano (SDU)

De acuerdo con Bruneau *et al.* (2003), Chang y Shinozuka (2004), Wang y Blackmore (2009), Mugume *et al.* (2015b) y Domínguez (2018), es posible analizar la RI en SDU y la relación entre los factores de RI, a partir de la curva teórica de desempeño, la cual se construye evaluando el desempeño del SDU durante un evento de falla, tal como se ilustra en la Figura 4.1.

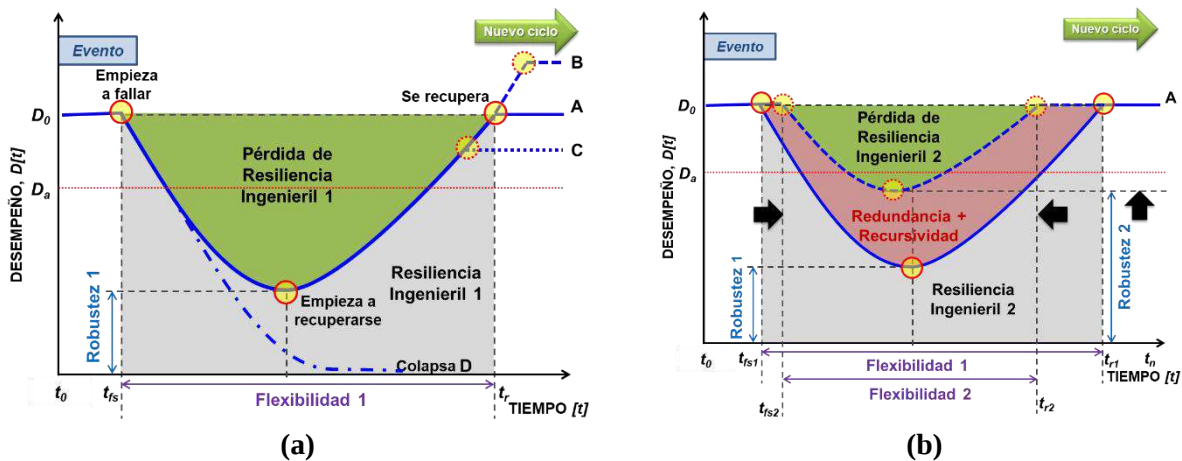


Figura 4.1 Curva teórica de desempeño para el análisis de RI en SDU (a) Sin estrategias de mitigación; y (b) Con estrategias de mitigación

Fuente: Adaptado de Bruneau *et al.* (2003), Chang y Shinozuka (2004), Wang y Blackmore (2009), Mugume *et al.* (2015b) y Domínguez (2018)

En la Figura 4.1, las líneas horizontales D_0 y D_a representan el nivel de desempeño inicial del SDU y su umbral aceptable (nivel aceptable de falla) respectivamente; por debajo de este umbral, el SDU presta

un servicio inadecuado (Mugume *et al.*, 2015b). La RI se define gráficamente como el área sombreada bajo la curva de desempeño entre el tiempo de inicio de la falla t_{fs} y el tiempo de recuperación t_r . Por el contrario, la pérdida de RI se define gráficamente como el área sombreada sobre la curva de desempeño considerando el mismo tiempo de análisis. El valor de la RI dependerá de los factores de *robustez* y *flexibilidad* (si estos factores son bajos, la RI del sistema disminuye, en caso contrario aumenta).

De acuerdo con la Figura 4.1a, si un evento de falla ocurre en el tiempo t_0 , éste podría comprometer la calidad del servicio poniendo a prueba su desempeño. Entre el tiempo t_0 y el tiempo de inicio de la falla t_{fs} , la calidad del servicio se mantiene en un nivel aceptable, pero si el evento continúa, el desempeño del SDU disminuye hasta un nivel de falla máximo resultante del evento considerado; este valor es la *robustez* del SDU (Ecuación 4.1) (Cimellaro *et al.*, 2010; Ayyub, 2014; Pant *et al.*, 2014).

$$Robustez = \min D(t) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde $D(t)$ es la función de desempeño $[0, 1]$

A partir del tiempo de inicio de la falla t_{fs} , la *flexibilidad* hace que el SDU se recupere, retornando a su condición inicial t_r , por lo tanto, a medida que la duración de la falla ($t_r - t_{fs}$) se reduce, el SDU se considera más flexible (Ecuación 4.2) (McDaniels *et al.*, 2008; Chang *et al.*, 2014; Pant *et al.*, 2014).

$$Flexibilidad = t_r - t_{fs} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde t_r es el tiempo de recuperación y t_{fs} es el tiempo de inicio de la falla.

Si en el SDU se implementan estrategias de mitigación basadas en la *redundancia* (ej., embalses, sistemas de bombeo, Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles - SUDS, tanques de almacenamiento, etc.) (Mugume *et al.*, 2015a) y/o *recursividad* (ej., cambio en la operación de bombas, limpieza y/o mantenimiento de la infraestructura, rehabilitación del SDU, etc.) (Wang y Blackmore, 2009; da Silva *et al.*, 2012) como se muestra en la Figura 4.1b, estas estrategias permitirán reducir la duración y magnitud de la falla, cambiando la forma de la curva de desempeño, mejorando su *flexibilidad* y *robustez* y en consecuencia su RI.

La *redundancia* y/o *recursividad* corresponden al área entre las curvas de desempeño antes y después de implementar dichas estrategias. La función de desempeño $D(t)$ que se muestra en la Figura 4.1, relaciona una característica dada normalizada en el rango de 0 a 1, donde 0 está relacionado con el colapso del sistema y 1 representa un desempeño perfecto; esta normalización se realiza para establecer valores comparativos cuando se realicen diferentes análisis de RI (Gharaibeh *et al.*, 2006; Binesh *et al.*, 2018).

Durante un evento de inundación, la función de desempeño se puede establecer a partir de un balance de masa de los volúmenes de agua que entran y salen del SDU cuando ocurre una inundación (Ecuación 4.3); este balance considera que inicialmente el SDU se encuentra libre de inundaciones y que estas ocurrirán por la escorrentía que ingresa al alcantarillado después del inicio de la inundación (Domínguez, 2018).

$$Ingresa\ al\ SDU = Permanece\ en\ el\ SDU + Inundación \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde *Ingresa al SDU* es el volumen que ingresa al SDU, *Permanece en el SDU* es el volumen que permanece en el SDU e *Inundación* es el volumen de inundación en el SDU.

Dividiendo todos los términos de la Ecuación 4.3 entre el volumen que *Ingresa al SDU* (si este es >0), se obtiene la función de desempeño normalizada $D(t)$, como se muestra en la Ecuación 4.4, donde $F(t)$ es el volumen de inundación, e $I(t)$ es el volumen que ingresa al SDU.

$$D(t) = \frac{Permanece\ en\ el\ SDU}{Ingresa\ al\ SDU} = 1 - \frac{Inundación}{Ingresa\ al\ SDU} = 1 - \frac{F(t)}{I(t)} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Para evitar indeterminaciones matemáticas o resultados negativos, el estado del SDU y el valor de $D(t)$ dependerán del numerador $F(t)$ y el denominador $I(t)$, como se presenta en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Estado del SDU y valor de $D(t)$ de acuerdo con el numerador y denominador

Valor del numerador $F(t)$	Valor del denominador $I(t)$	Estado del SDU	Valor de la función $D(t)$
0	0	Sin falla	1
0	Mayor que 0	Sin falla	1
Mayor que 0	0	Colapsa	0
Grande	Pequeño	Colapsa	0
Pequeño	Grande	Falla parcial	$D(t) = 1 - \frac{F(t)}{I(t)}$

Fuente: Adaptado de Lee *et al.* (2019)

Emplear volúmenes tiene como ventaja que facilita la implementación de la función $D(t)$ en modelos computacionales de simulación hidrodinámica 1D, que permiten simular las inundaciones superficiales de la red de alcantarillado mediante “conos de inundación virtuales”. En estos modelos las inundaciones ocurren cuando la superficie del agua en un nodo excede la profundidad máxima definida o si ingresa más volumen a un nodo del que puede almacenarse o liberarse durante un período de tiempo determinado (Rossman, 2015).

En esta modelación, se supone que los volúmenes excedentes se almacenan temporalmente en la parte superior de los nodos (ej., pozos de inspección o sumideros) como “conos de inundación virtuales” y que posteriormente vuelven a ingresar al SDU cuando la capacidad hidráulica del mismo lo permite (Maksimović *et al.*, 2010; Butler y Davies, 2011; Rossman, 2015). Tal enfoque proporciona una modelación de la inundación robusta y simplificada que brinda una buena indicación del volumen total de inundación y los puntos críticos en una red de alcantarillado (Butler y Davies, 2011).

La Figura 4.2 muestra el principio del “cono de inundación virtual” para modelar inundaciones de la red de alcantarillado en modelos 1D. Sin embargo, considerar volúmenes tiene como desventaja que podría ser menos realista para la modelación de inundaciones durante eventos extremos de riesgo alto (Periodos de Retorno – TR entre 50 y 100 años) porque los efectos de las inundaciones están excluidos del análisis. En consecuencia, el volumen de inundación puede dar lugar a imprecisiones en la estimación del nivel y la extensión de la inundación superficial del SDU en su totalidad (Maksimović *et al.*, 2010; Butler y Davies, 2011).

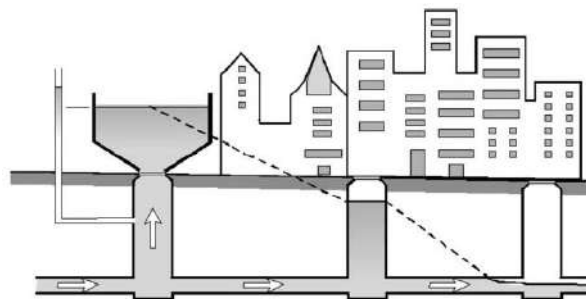


Figura 4.2 Enfoque convencional para la modelación 1D de inundaciones utilizando un cono virtual

Fuente: Maksimović *et al.* (2010) y Butler y Davies (2011)

Para evaluar niveles y extensiones de las inundaciones en la cuenca urbana durante eventos extremos de riesgo alto se recomienda la modelación bidimensional (2D), la cual emplea los resultados de la modelación 1D acoplados a un Modelo de Elevación Digital - *Digital Elevation Model* (DEM) (van Waveren *et al.*, 1999). Sin embargo, la desventaja de la modelación 2D aplicada a cuencas urbanas es que

actualmente es difícil contar con un DEM que tenga una buena resolución que permita desarrollar un análisis adecuado de las inundaciones superficiales (resolución del DEM menor a 1 m) (Muthusamy *et al.*, 2021).

Dado que la curva de desempeño es empleada para ilustrar el comportamiento de un SDU durante una inundación, en la literatura se ha propuesto cuantificar la RI mediante la Ecuación 4.5 (Mugume *et al.*, 2015b; Mugume y Butler, 2016; Wang *et al.*, 2019b).

$$RI = \frac{1}{t_r - t_{fs}} \int_{t_{fs}}^{t_r} D(t) dt \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde, t_r es el tiempo de recuperación, t_{fs} es el tiempo de inicio de la falla y $D(t)$ es la función de desempeño. En esta ecuación el cálculo de la RI está normalizada entre 0 y 1, donde 0 indica el nivel más bajo de RI y 1 el nivel más alto.

Por su parte, la RSE es multidimensional y en su medición es necesario incluir variables e indicadores provenientes de diferentes ámbitos sociales y ecológicos (Folke, 2006a). Por este motivo, en los modelos de RSE ha existido una tendencia a formular índices compuestos, construidos como función de los factores, variables e indicadores que conjuntamente miden una característica o atributo del sistema en estudio (Suárez *et al.*, 2016).

La formulación de índices de RSE ha sido motivada por diferentes propósitos, ya que éstos pueden ser una herramienta de apoyo para la toma de decisiones y la gestión, servir para guiar procesos participativos y la consecución de consensos y ser utilizados como herramientas de investigación (Parris y Kates, 2003). Adicionalmente, los índices presentan como ventaja que son más fáciles de interpretar, gracias a su capacidad de síntesis, por lo que han ganado un creciente interés como una herramienta eficaz que contribuye al análisis de la RSE (Suárez, 2012).

El uso de un índice de RSE se justifica por tres razones (Schuschny y Soto, 2009; Suárez, 2012): *i.* Permite integrar los diferentes factores, variables e indicadores cualitativos y cuantitativos de la RSE en un valor; *ii.* Su valor permite cuantificar la RSE en una escala definida, la cual facilita establecer el nivel de RSE de un SDU; y *iii.* Los factores, variables e indicadores pueden ser ponderados para reflejar su importancia relativa dentro de un contexto particular.

Los modelos conceptuales de RSE recientemente desarrollados por Kotzee y Reyers (2016), Flynn y Davidson (2016), Qasim *et al.* (2016), Hammond *et al.* (2018), Moghadas *et al.* (2019) y Rezende *et al.* (2019b), han formulado índices para analizar la RSE en SDU. La revisión de estos modelos permitió identificar el procedimiento que se presenta en la Figura 4.3 de formulación de un índice de RSE aplicable a SDU.

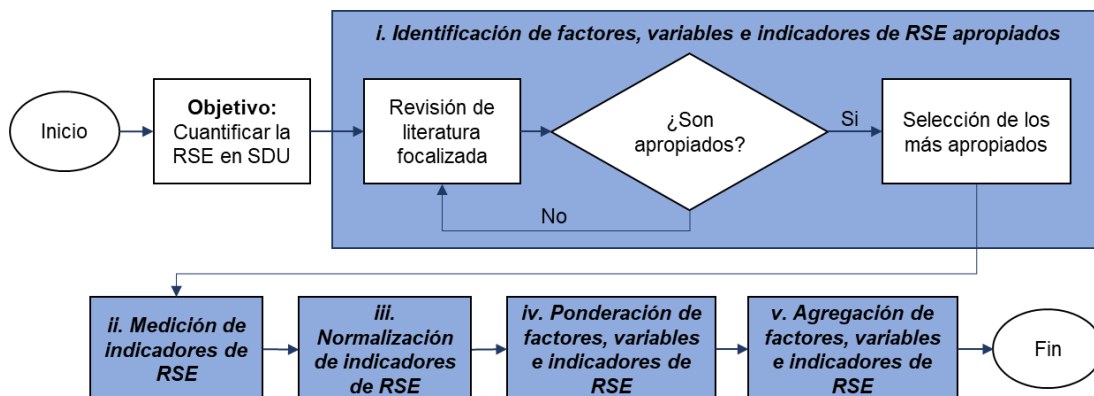


Figura 4.3 Procedimiento de formulación de un índice de RSE aplicable a SDU

Fuente: Adaptado de Kotzee y Reyers (2016); Qasim *et al.* (2016); Hammond *et al.* (2018); Moghadas *et al.* (2019) y Rezende *et al.* (2019b)

Considerando que la RI y RSE se definen en contextos diferentes que inicialmente se calculan de forma aislada, para poder integrarlos en un solo valor de resiliencia en la literatura se ha propuesto que los resultados de la RI y RSE se normalicen en una misma escala entre 0 y 1. Con los resultados normalizados, la Resiliencia Integral (IR), integración entre la RI y RSE, se calcula a partir de la siguiente ecuación (Liu *et al.*, 2012):

$$IR = W_I \times RI + W_{SE} \times RSE \quad \text{Ecuación 4.6}$$

$$W_I + W_{SE} = 1 \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde W_I y W_{SE} , son el peso de la RI y RSE respectivamente.

Finalmente, es importante destacar que al momento de determinar el peso W_I y W_{SE} es necesario considerar la correlación entre indicadores de RI y RSE con el fin de evitar la doble contabilidad que pudiera darse cuando dos o más indicadores, aunque parcialmente, midan el mismo fenómeno (Schuschny y Soto, 2009). Por ese motivo, deben realizarse pruebas estadísticas que evalúen la correlación entre indicadores, como por ejemplo, el cálculo del coeficiente de Spearman y atenuar el peso de aquellos indicadores que pudieran estar correlacionados balanceando el peso W_I y W_{SE} .

4.2 METODOLOGÍA

Para la construcción del modelo conceptual propuesto en esta tesis, los modelos presentados en la revisión de literatura se sometieron a un análisis el cual consistió en identificar: elementos conceptuales, componentes, estructura, características, principios de funcionamiento y forma de análisis de la resiliencia, considerando los enfoques de RI y RSE. De los modelos de RI desarrollados por Butler *et al.* (2016) en la Universidad de Exeter - Inglaterra, y Domínguez (2018) en la Universidad del Valle – Colombia, se adoptó la configuración básica: sistema, amenaza y estrategias para la definición de la estructura.

Adicionalmente, se incluyó información de discusiones específicas realizadas con expertos nacionales e internacionales en drenaje urbano y resiliencia, y profesionales de instituciones del sector agua y saneamiento, de acuerdo con lo presentado en la Tabla 3.3 del Capítulo 3. Durante el desarrollo de estas discusiones, los expertos y profesionales consultados desde su experiencia contribuyeron a través de argumentaciones a identificar elementos socio-ecológicos claves a incluir en el modelo conceptual tales como la gobernanza, los residuos sólidos, la gestión del riesgo y el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones. Las discusiones también ayudaron a mejorar la interrelación entre los bloques temáticos. Los resúmenes de las discusiones se recopilaban en actas de reunión y relatorías de las entrevistas y talleres.

El modelo conceptual propuesto presenta una estructura cíclica conformada por los siguientes cuatro bloques temáticos: i. *Definición del SDU*; ii. *Escenarios de Amenaza*; iii. *Análisis de Resiliencia*; y iv. *Formulación de Estrategias*.

Definido el orden de los bloques dentro de la estructura del modelo, el ensamble se realizó teniendo en cuenta el propósito de cada bloque y su relación con el bloque siguiente. La información contenida en cada bloque, fue discriminada buscando obtener subdivisiones más específicas que dieron origen a pasos macro para evaluar la resiliencia, mientras los conceptos contenidos en cada subdivisión fueron organizados de acuerdo con sus relaciones directas, permitiendo desarrollar una secuencia lógica y detallada.

En la Figura 4.4 se presentan los bloques temáticos del modelo conceptual propuesto.

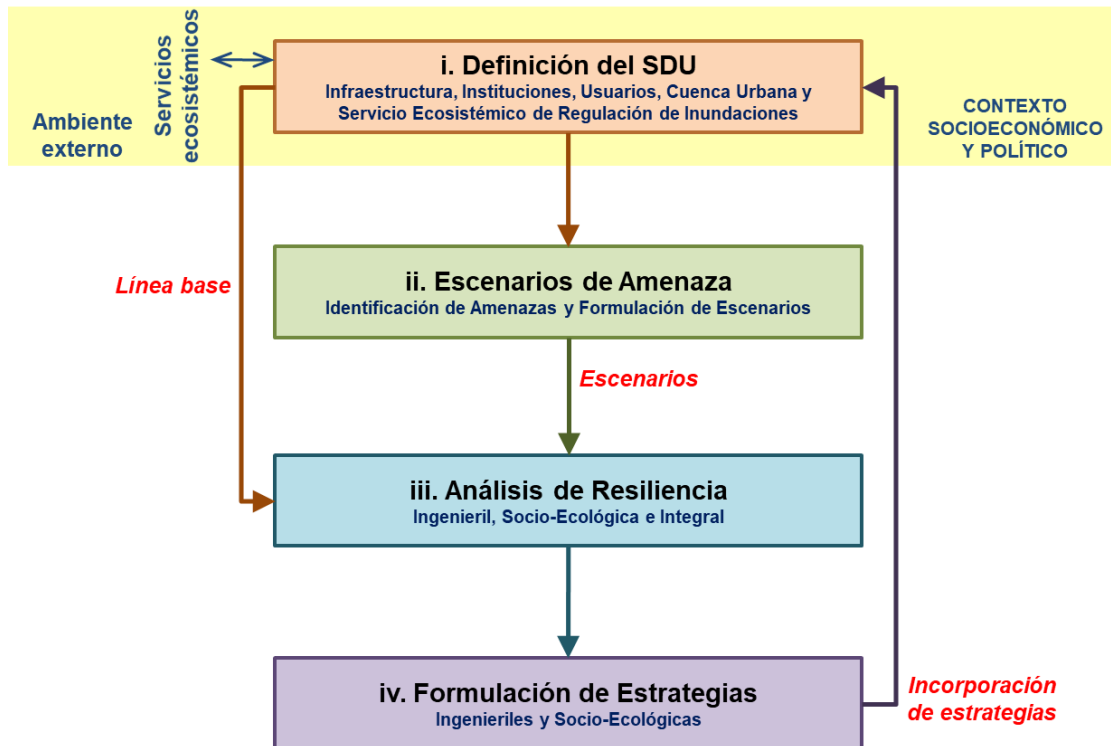


Figura 4.4 Bloques temáticos del modelo conceptual

A continuación, se describe la metodología propuesta de cada uno de los bloques temáticos.

i. Definición del SDU. Este bloque temático se formuló para establecer la información necesaria para delimitar y caracterizar el SDU a estudiar en su condición de línea base. Para esto se revisó en la literatura en drenaje urbano y en los modelos conceptuales cómo está conformado un SDU, teniendo en cuenta los componentes del Sistema Ingenieril (SI) (infraestructura y los procesos que se desarrollan en esta) y del Sistema Socio-Ecológico (SSE) (instituciones, usuarios, cuenca y el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones).

La infraestructura y sus procesos se delimitaron a la red alcantarillado (tipo de alcantarillado, elementos del alcantarillado y caudal de agua residual) sin incluir la PTAR y el cuerpo receptor, esta delimitación se realizó para considerar en el modelo conceptual solo el componente de cantidad de agua (inundaciones). Las instituciones se delimitaron a aquellas que tienen influencia en los SDU localmente: autoridades locales que regulan y ordenan la cuenca y la entidad prestadora del servicio de alcantarillado. Los usuarios se delimitaron en residencial y no residencial (comercial, industrial e institucional).

La cuenca se delimitó en los aspectos físicos como la topografía, usos y tipo del suelo, impermeabilidad y eventos de lluvia. El servicio ecosistémico de regulación de inundaciones que brinda el SDU de forma natural se delimitó en el almacenamiento e infiltración de la escorrentía en áreas verdes (bosques, jardines, parques y separadores viales) y cuerpos hídricos (humedales, lagunas, pantanos y ríos).

ii. Escenarios de Amenaza. Este bloque temático se desarrolló para identificar las amenazas y formular sus escenarios. Para facilitar la identificación de amenazas, se empleó la clasificación dada por Butler *et al.* (2016), quienes clasifican las amenazas en: 1). Externas: las del entorno natural o construido y las instituciones reguladoras; y 2). Internas: las que se originan al interior del SDU por la infraestructura, el proveedor del servicio y los usuarios.

Las amenazas que se consideraron fueron aquellas que pueden causar inundaciones debido a fallas del SDU. En el modelo propuesto las amenazas deben tratarse de forma individual y es el usuario quién prioriza las más importantes para la formulación de escenarios.

En la Tabla 4.6 se describen las amenazas consideradas en el modelo conceptual asociadas a las fallas que causan.

Tabla 4.6 Amenazas consideradas en el modelo conceptual

Tipo	Amenazas	Fallas
Externas	- Incremento de la intensidad de lluvias - Reducción de la permeabilidad del suelo	Sobrecarga hidráulica debido a cambios en los caudales de entrada (inundaciones)
Internas	- Obstrucciones por residuos sólidos (basuras, escombros y sedimentos) - Daños de uno o varios elementos de la infraestructura (aliviaderos, bombas, canales, tanques o tuberías)	- Sobrecarga hidráulica debido a cambios en la capacidad hidráulica (inundaciones) - Inundación debido a daños de uno o varios elementos de la infraestructura del SDU (aliviaderos, bombas, canales, tanques o tuberías)

iii. Análisis de Resiliencia. Este bloque temático se formuló para realizar el análisis de RI, RSE y su integración a través de un índice IR. El índice IR permite conectar el enfoque ingenieril y socio-ecológico, con el objetivo de obtener un valor cualitativo y cuantitativo global de resiliencia para el SDU estudiado. En el análisis de resiliencia se involucran los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU.

A continuación, se describen los pasos propuestos para el análisis de RI, RSE y su integración.

Para el análisis de RI se adoptó la curva teórica de desempeño para calcular los factores de RI y la RI, siguiendo dos pasos: 1). Graficar la curva de desempeño; y 2). Calcular la RI y sus factores.

Paso 1. Graficar la curva de desempeño. Se graficó la curva de desempeño, considerando eventos de lluvia asociados al TR fijado a la función básica y complementaria del drenaje urbano según el uso del suelo y el tipo de vía respectivamente. Este análisis se realizó para la condición de línea base y los escenarios de amenaza considerados empleando la Ecuación 4.4:

$$D(t) = 1 - \frac{F(t)}{I(t)}$$

Donde $D(t)$ es la función de desempeño, $F(t)$ es el volumen de inundación, e $I(t)$ es el volumen que ingresa al SDU. Para obtener la función de desempeño se realizó simulación hidrodinámica de los eventos de lluvia empleando el modelo SWMM.

Paso 2. Calcular la RI y sus factores. Se calculó el indicador de *RI por Inundaciones* y los factores de RI (*flexibilidad, recursividad, redundancia y robustez*) empleando la curva de desempeño y las Ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.5 respectivamente.

$$Robustez = \min D(t)$$

$$Flexibilidad = t_r - t_{fs}$$

$$RI = \frac{1}{t_r - t_{fs}} \int_{t_{fs}}^{t_r} D(t) dt$$

Los factores de *redundancia* y/o *recursividad* se calcularon como el área entre las curvas de desempeño antes y después de implementar estrategias de mitigación ingenieriles en el SDU, por lo tanto estos factores se obtuvieron mediante el resultado de la diferencia de calcular la RI antes y después de implementar dichas estrategias.

Es adecuado resaltar que el indicador de *RI por Inundaciones* al tener correlación con los indicadores de RSE: *porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos*, *pendiente predominante del terreno en porcentaje*, *porcentaje de área impermeable*, *porcentaje de áreas verdes* y *porcentaje de áreas de cuerpos hídricos*, estos indicadores de RSE se calcularon previamente para incluir esta información en el análisis de RI y así tener resultados consistentes de RI.

Por su parte, el análisis de RSE se realizó mediante la construcción de un índice compuesto propuesto en esta investigación, el cual agrega los factores, variables e indicadores de RSE siguiendo los últimos cuatro pasos de la Figura 4.3: 1). Medición de indicadores de RSE; 2). Normalización de indicadores de RSE; 3). Ponderación de factores, variables e indicadores de RSE; y 4). Agregación de factores, variables e indicadores de RSE.

Paso 1. Medición de indicadores de RSE. Consistió en la medición de indicadores mediante la búsqueda de los valores en los registros administrativos que llevan las autoridades locales y entidades encargadas de la prestación del servicio de alcantarillado.

Paso 2. Normalización de indicadores de RSE. Consistió en la normalización de indicadores en un intervalo de 0 a 1, donde los indicadores dados en porcentaje se dividieron por 100 y los indicadores cualitativos se normalizaron con el método de categorización de escalas.

Paso 3. Ponderación de factores, variables e indicadores de RSE. Esta ponderación se realizó estableciendo diferentes pesos que dan cuenta de la importancia relativa de cada factor, variable e indicador en el agregado. En el presente estudio, se adoptó pesos proporcionales de acuerdo con la literatura (Folke, 2006b) y un análisis estadístico de las respuestas de los expertos en drenaje urbano y resiliencia y profesionales de instituciones del sector agua y saneamiento, quienes consideraron que todas las dimensiones socio-ecológicas del tema bajo análisis son igualmente prioritarias.

En la Tabla 4.7 se presentan los pesos de los factores, variables e indicadores de RSE considerados en el modelo conceptual distribuidos empleando pesos proporcionales.

Tabla 4.7 Pesos de los factores, variables e indicadores de RSE en SDU

Factores	Peso (%)	Variables	Peso (%)	Indicadores	Peso (%)
Social	50	Gobernanza	12,5	Nivel de coordinación institucional	6,25
				Porcentaje de asentamientos informales	6,25
		Riesgo de inundación	12,5	Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	12,5
		Residuos sólidos en el SDU	12,5	Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	12,5
		Desarrollo económico de la población	12,5	Porcentaje de hogares con NBI	12,5
Ecológico	50	Características físicas de la cuenca urbana	25,0	Pendiente predominante del terreno en porcentaje	12,5
				Porcentaje de área impermeable	12,5
		Regulación de las inundaciones	25,0	Porcentaje de áreas verdes	12,5
				Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	12,5
Total	100		100		100

Paso 4. Agregación de factores, variables e indicadores de RSE. El método de agregación adoptado en el modelo conceptual propuesto es el WSM (Schuschny y Soto, 2009). El uso del método WSM se justifica por dos razones: 1). Considera simultáneamente múltiples factores, variables e indicadores que representan diferentes dimensiones; y 2). Los factores, variables e indicadores pueden ser ponderados para reflejar su importancia relativa dentro de un contexto particular.

El método WSM permite agregar los indicadores en un subíndice como la sumatoria del valor de cada indicador normalizado y_t^{ij} por su peso w^i , así (Schuschny y Soto, 2009):

$$\text{Subíndice} = \sum_{i=1}^p w^i \cdot y_t^{ij} = w^1 y_t^{1j} + \dots + w^p y_t^{pj} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

$$\text{con } \sum_{i=1}^p w^i = 1 \text{ y } 0 \leq w^i \leq 1; 1 \leq i \leq p; 1 \leq j \leq N \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Los subíndices que conforman cada variable se agregan nuevamente empleando este mismo método de acuerdo con los pesos estimados para las variables, formando así un subíndice por factor y después estos se agrupan, conformando el índice compuesto.

Aplicando el método WSM, se calculó el valor de cada variable V_j como la sumatoria del peso W_i de cada indicador por su valor normalizado $\bar{I}_i$, así:

$$V_j = \sum_{i=1}^n W_i \bar{I}_i \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Después, se calculó el valor de cada factor socio-ecológico F_{SE} , como la sumatoria del peso W_j de cada variable por el valor obtenido por cada variable V_j del factor F_{SE} correspondiente, así:

$$F_{SE} = \sum_{j=1}^m W_j V_j \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Posteriormente, se calculó la RSE como la suma del peso de cada factor por el valor obtenido de cada factor correspondiente, así:

$$RSE = W_{SOC} \times F_{SOC} + W_{ECO} \times F_{ECO} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Donde W_{SOC} , W_{ECO} es el peso y F_{SOC} , F_{ECO} son los valores de cada factor *social* y *ecológico* respectivamente.

Para cuantificar el índice IR, se adoptó la Ecuación 4.6 calculada con los resultados del análisis de RI (Ecuación 4.5) y RSE (Ecuación 4.12), así:

$$IR = W_I \times RI + W_{SE} \times RSE \quad \text{Ecuación 4.13}$$

$$W_I + W_{SE} = 1$$

Donde IR es el índice IR y W_I y W_{SE} , son el peso de la RI y RSE respectivamente. En el modelo conceptual con el fin de evitar la doble contabilidad que pudiera darse por las correlaciones entre algunos indicadores de RSE con la RI y así balancear W_I y W_{SE} para calcular la IR, se evaluó el grado de correlación entre los indicadores y se estimó los pesos más adecuados W_I y W_{SE} , mediante simulaciones estocásticas de Monte Carlo, los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 5.9 del Capítulo 5.

La RI, RSE y el índice IR miden la resiliencia en una escala de 0 a 1, la cual se categorizó en los cinco rangos cuantitativos y cualitativos de resiliencia que se presentan en la Tabla 4.8. Para la construcción de esta tabla se adaptaron las escalas de resiliencia propuestas por Sweya *et al.* (2021) y Zhang *et al.* (2021).

Tabla 4.8 Escala de la RI, RSE y el índice IR

Escala cuantitativa	Escala cualitativa	Descripción
0,00 – 0,29	Resiliencia muy baja	SDU que falla frecuentemente durante eventos de riesgo bajo causando daños o pérdidas de mediana o alta magnitud
0,30 – 0,49	Resiliencia baja	SDU que falla frecuentemente durante eventos de riesgo medio y alto causando daños o pérdidas de mediana o alta magnitud
0,50 – 0,69	Resiliencia moderada	SDU que falla ocasionalmente durante eventos de riesgo medio y alto causando daños o pérdidas de mediana magnitud
0,70 – 0,89	Resiliencia alta	SDU que falla ocasionalmente durante eventos de riesgo alto causando daños o pérdidas de baja magnitud
0,90 – 1,00	Resiliencia muy alta	SDU que falla solo durante eventos catastróficos

Fuente: Adaptado de Sweya *et al.* (2021) y Zhang *et al.* (2021)

iv. Formulación de Estrategias. Para mejorar la resiliencia, se propuso un bloque de formulación de estrategias de mitigación. En el modelo, las estrategias pueden asociarse a los escenarios de amenaza formulados para evaluar su impacto en la resiliencia. El modelo también permite priorizar las estrategias de mitigación, para lo cual se requiere incorporar en el SDU diferentes estrategias, después evaluarlas en el modelo y finalmente seleccionar las que generen el mayor índice IR.

Para obtener un listado de estrategias a incluir en el modelo conceptual se revisó en la literatura las estrategias de mitigación ingenieriles y socio-ecológicas en SDU; de estas se seleccionaron solo las que permiten mitigar el riesgo de inundación.

En la Tabla 4.9 se describen las estrategias de mitigación que considera el modelo conceptual, estas estrategias se pueden combinar para evaluar efectos sinérgicos en la reducción del riesgo de inundación y el aumento de la resiliencia.

Tabla 4.9 Estrategias de mitigación que considera el modelo conceptual

Tipo	Estrategias de mitigación
Ingenieriles	Canalizaciones, cambio en la operación de bombas, diques, embalses, limpieza y/o mantenimiento de la infraestructura, rehabilitación del sistema, sistemas de bombeo, SUDS y tanques de almacenamiento
Socio-Ecológicas	Educación ambiental, mejorar la coordinación institucional, planeación urbana y reglamentación en los usos del suelo

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo conceptual propuesto de análisis de resiliencia en SDU por cantidad de agua (inundaciones) conecta los bloques temáticos: *Definición del SDU*, *Escenarios de Amenaza*, *Análisis de Resiliencia* y *Formulación de Estrategias* y analiza la resiliencia por medio de los factores de RI: *flexibilidad, recursividad, redundancia y robustez*, y los factores de RSE: *social y ecológico*. Se consideran las siguientes variables: *desempeño del SDU, gobernanza, riesgo de inundación, residuos sólidos en el SDU, desarrollo económico de la población, características físicas de la cuenca urbana y regulación de inundaciones*.

Mediante la aplicación de este modelo se puede analizar la resiliencia de un SDU integrando aspectos ingenieriles y socio-ecológicos en tres condiciones: *i.* En su condición de línea base (antes de presentarse las amenazas); *ii.* Frente a diferentes amenazas (con escenarios de amenaza); y *iii.* Cuando se implementan estrategias para mejorar la resiliencia (con estrategias de mitigación).

A continuación se describen cada uno de los bloques temáticos.

Bloque 1. Definición del SDU. Este bloque es una combinación de la infraestructura, las instituciones, los usuarios, la cuenca urbana y el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones en interrelación, razón por la cual este bloque se considera esencial, pues en él se describen los componentes que conforman el SDU y sus relaciones iniciales, información que se emplea para analizar la resiliencia del SDU. Este bloque inicia con la delimitación del SDU a analizar para proceder con la identificación de sus subsistemas. La caracterización corresponde a la recolección de información necesaria de los componentes del SDU.

La información se divide en cuatro clases: la asociada a la infraestructura, instituciones, usuarios, cuenca urbana y el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones. Esta información es necesaria para definir la configuración inicial del SDU. La información recopilada es la base para representar al SDU en su condición inicial, con el fin de determinar su resiliencia en el bloque temático *Análisis de Resiliencia*.

Bloque 2. Escenarios de Amenaza. Este bloque representa las amenazas externas o internas que pueden causar inundaciones. Este bloque inicia identificando las amenazas que presenta el SDU

caracterizado, con el fin de identificar y generar cambios en el mismo. La identificación de amenazas debe realizarse para cada SDU en estudio, pues cada sistema es propenso a ciertas amenazas específicas.

En los SDU, las amenazas no tienen el mismo grado de importancia y no es conveniente tratarlas simultáneamente, es necesario que el usuario del modelo las priorice con el objetivo de identificar las que son más comunes y causarían una mayor reducción de la resiliencia del SDU. La configuración inicial del sistema junto con la identificación y priorización de amenazas, son la base para la formulación de escenarios de amenaza y su posterior evaluación.

La formulación de escenarios de amenaza se utiliza para cuantificar la resiliencia del SDU ante cada amenaza, los resultados que se generan son de utilidad para verificar si la priorización de amenazas realizada anteriormente es adecuada, por lo que puede presentarse un ajuste en dicha priorización. Si el SDU es resiliente a los escenarios de amenaza formulados, se pueden estudiar otros escenarios que reduzcan su resiliencia inicial.

Bloque 3. Análisis de Resiliencia. El análisis de la resiliencia se realiza mediante el tercer bloque denominado *Análisis de Resiliencia*, el cual emplea los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU para cuantificar la RI, RSE y su integración mediante el índice IR. En este bloque se establece como los factores, variables e indicadores impactan el SDU, generando modificaciones en su comportamiento, lo que refleja cambios en la resiliencia.

Bloque 4. Formulación de Estrategias. El cuarto bloque representa las estrategias para mitigar el riesgo de inundación y así mejorar la resiliencia. Este bloque comprende la incorporación de estrategias de mitigación ingenieriles y/o socio-ecológicas que causan que la resiliencia inicial del SDU cambie con fines de generar su aumento. Este bloque también permite priorizar las estrategias, para lo cual el usuario debe incorporar al SDU las diferentes estrategias que desee evaluar de tal forma que puedan ser analizadas mediante el índice IR; los resultados de estos análisis al ser comparados permiten identificar el impacto de las estrategias con fines de priorización.

En la Figura 4.5 se presenta el modelo conceptual propuesto para el análisis de la resiliencia de SDU.

El modelo conceptual propuesto cuantifica la RI, RSE y su integración directamente mediante los factores, variables e indicadores clave de resiliencia en SDU. La estructura cíclica representa la dinámica de los SDU, por lo que a pesar de ser importante en algunos casos realizar análisis estáticos, los SDU realmente no están en un estado de equilibrio. En este sentido, debido a la dependencia de cada bloque con los resultados de su bloque inmediatamente anterior, es necesario que cada uno se desarrolle completamente para tener la información requerida por los bloques siguientes y así evitar errores en los cálculos de la resiliencia.

El modelo propuesto permite a través de los factores, variables e indicadores identificar debilidades y fortalezas de la resiliencia en SDU, facilitando reconocer componentes críticos del SDU, una mejor comprensión de los procesos que se dan en el SDU y focalizar las estrategias para mejorar la resiliencia de los SDU, a diferencia de la mayoría de modelos que se enfocan solo en el resultado global de la resiliencia sin considerar la interrelación de los factores, variables e indicadores. Adicionalmente, la estructura cíclica del modelo propuesto permite evaluar el efecto en la resiliencia de la incorporación de diferentes estrategias de mitigación o cambios en el SDU, lo cual no es factible de realizar en los modelos de estructura lineal.

Por otra parte, el modelo propuesto al considerar la generación de escenarios como herramienta para evaluar diferentes amenazas y el conocimiento de toda la información posible del SDU, permite que el modelo se ajuste a diferentes condiciones brindando más elementos para tomar decisiones óptimas. La formulación de escenarios de amenaza para el análisis de resiliencia también fue considerado en los modelos desarrollados por Butler *et al.* (2016) y Domínguez (2018).

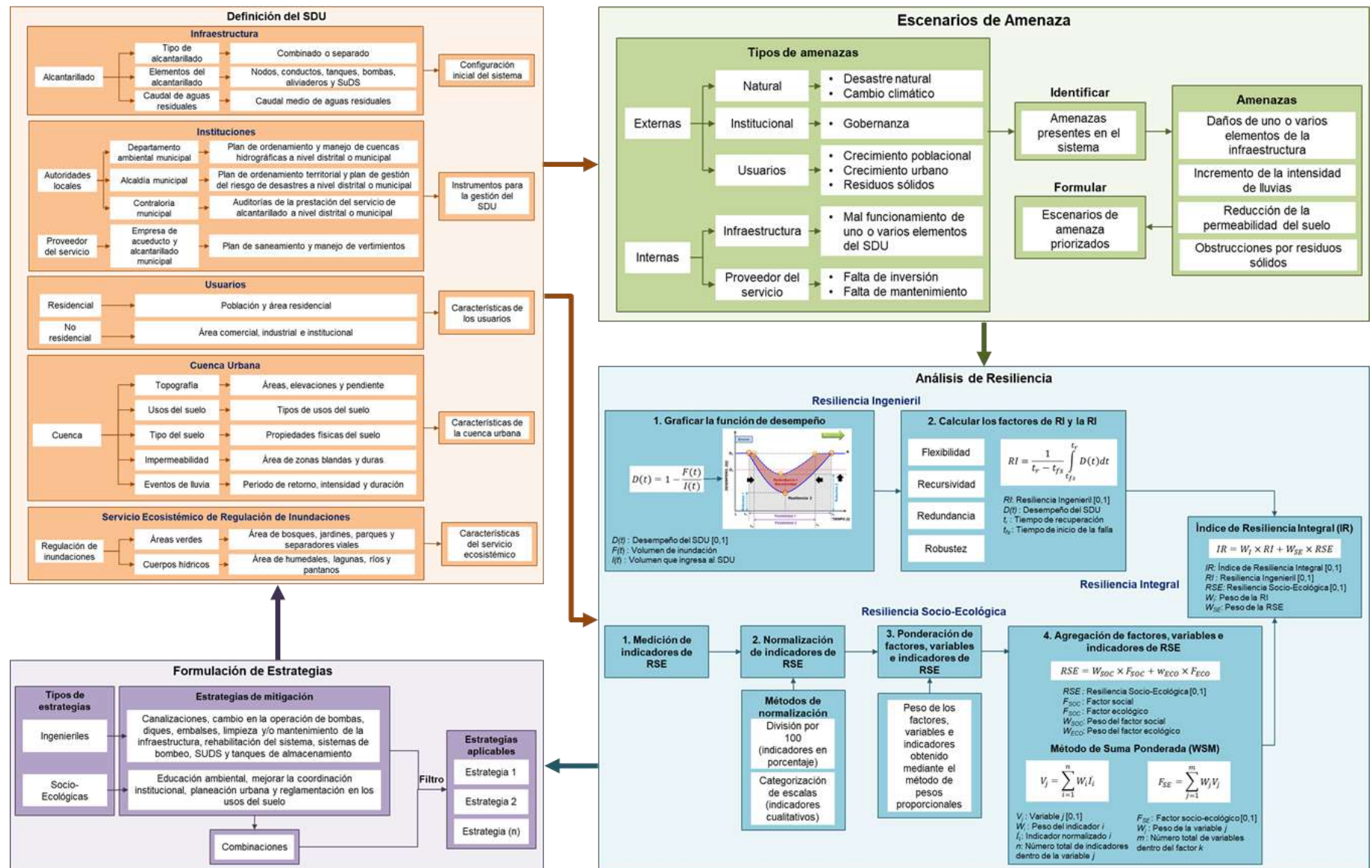


Figura 4.5 Modelo conceptual para el análisis de la resiliencia de SDU

Aunque el modelo propuesto adoptó la configuración básica sistema, amenaza y estrategias para la definición de la estructura a partir de los modelos desarrollados por Butler *et al.* (2016) y Domínguez (2018), difiere de éstos porque además tiene en cuenta aspectos socio-ecológicos de las instituciones, los usuarios, la cuenca y el servicio ecosistémico de regulación de las inundaciones que influyen en la resiliencia de los SDU, y adicionalmente incluye una clasificación más específica de las amenazas y las estrategias de mitigación para focalizar el análisis de resiliencia y también presenta un procedimiento más detallado de los pasos requeridos en el análisis de resiliencia de SDU.

Con relación a los modelos de RI desarrollados por Ning *et al.* (2013), Mugume *et al.* (2015b), Butler *et al.* (2016), Binesh *et al.* (2018) y Domínguez (2018), este modelo tiene en común que permite analizar la resiliencia para el componente de cantidad de agua (inundaciones); sin embargo, estos modelos no involucran aspectos socio-ecológicos y además en su mayoría desconocen que su configuración puede ser empleada para evaluar y mejorar los factores de RI; el presente modelo fue formulado para conocer al detalle los cambios que se producen en estos factores al implementar estrategias de mitigación.

En general, el modelo propuesto difiere de los modelos de RSE desarrollados por Ahern *et al.* (2014), Kotzee y Reyers (2016), Flynn y Davidson (2016), Qasim *et al.* (2016), Hammond *et al.* (2018), Moghadas *et al.* (2019) y Rezende *et al.* (2019b), porque además de involucrar el componente ingenieril, también permite desarrollar un proceso de análisis de RSE más focalizado a las amenazas que afectan la resiliencia de los SDU, y las estrategias que estos sistemas pueden incorporar para mejorar la resiliencia. Estas características hacen que el modelo tenga un enfoque más holístico al incluir aspectos ingenieriles y socio-ecológicos.

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO 4

El modelo conceptual propuesto integra elementos de la RI y la RSE mediante el índice IR y se compone de cuatro bloques temáticos en una estructura cíclica: *i. Definición del SDU*; *ii. Escenarios de Amenaza*; *iii. Análisis de Resiliencia*; y *iv. Formulación de Estrategias*. En el primer bloque, se definen las características del SDU, lo cual permite establecer la condición inicial del SDU; en el segundo bloque se identifican las amenazas que puede afrontar el SDU y se formulan los escenarios de amenaza priorizados; en el tercero se emplean los factores, variables e indicadores de resiliencia para establecer el nivel de resiliencia del SDU y finalmente, en el cuarto bloque se establecen las estrategias de mitigación que se pueden incorporar en el SDU, de tal forma que pueda mejorar la resiliencia; una vez incorporadas las estrategias, comienza un nuevo ciclo de análisis.

En el bloque de *Análisis de Resiliencia* se utiliza el concepto de curva de desempeño como herramienta para obtener la RI, un índice de RSE el cual se obtiene agregando los factores, variables e indicadores de RSE y el índice IR que integra la RI y la RSE. El índice IR desarrollado en esta investigación permite establecer qué tan resiliente es el SDU en su condición inicial, frente a amenazas que generan inundaciones y cuando se incorporan estrategias de mitigación.

Para el análisis de la RSE en el modelo conceptual propuesto, primero se normalizan los indicadores de RSE empleando el método de división por 100 para los indicadores en porcentaje y la categorización de escalas para los indicadores cualitativos, después se ponderan los factores, variables e indicadores de RSE empleando el método de pesos proporcionales y finalmente se agregan los factores, variables e indicadores de RSE mediante el método WSM.

El modelo conceptual constituye un aporte para el análisis integral de la resiliencia en SDU por cantidad (inundaciones), ya que incluye aspectos tanto ingenieriles del desempeño del SDU como socio-ecológicos de las instituciones, los usuarios, la cuenca y el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones. Este enfoque hace que el modelo desarrollado sea novedoso y particularmente útil como

herramienta de apoyo para los tomadores de decisiones en la gestión de SDU, contribuyendo de esta manera a lograr que los SDU sean resilientes frente a amenazas que alteran su estado original.

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL EN UN SISTEMA DE DRENAJE URBANO

5.1 REVISIÓN DE LITERATURA

La evaluación de un modelo conceptual consiste en examinar su estructura y el comportamiento del mismo (Wang y Grant, 2019). En un modelo conceptual como el desarrollado, inicialmente se debe evaluar si su estructura es coherente y si las relaciones representadas en él tienen una interpretación lógica. Luego, se debe revisar la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del SDU real. Finalmente, se debe evaluar la sensibilidad del modelo a cambios en sus indicadores, lo cual usualmente consiste en una serie de simulaciones en las que se cambia el valor de un indicador, o un conjunto de indicadores, para una simulación dada y se observa el efecto subsecuente sobre el comportamiento del modelo.

La importancia relativa de cada paso que se debe seguir durante la evaluación del modelo en particular depende de los objetivos específicos del mismo. Si el modelo no cumple con los objetivos durante cualquiera de estos pasos de evaluación, se debe regresar al paso anterior para hacer las modificaciones apropiadas (Jørgensen y Brian, 2011; Wang y Grant, 2019).

En la Figura 5.1 se presentan los pasos para la evaluación de un modelo conceptual.

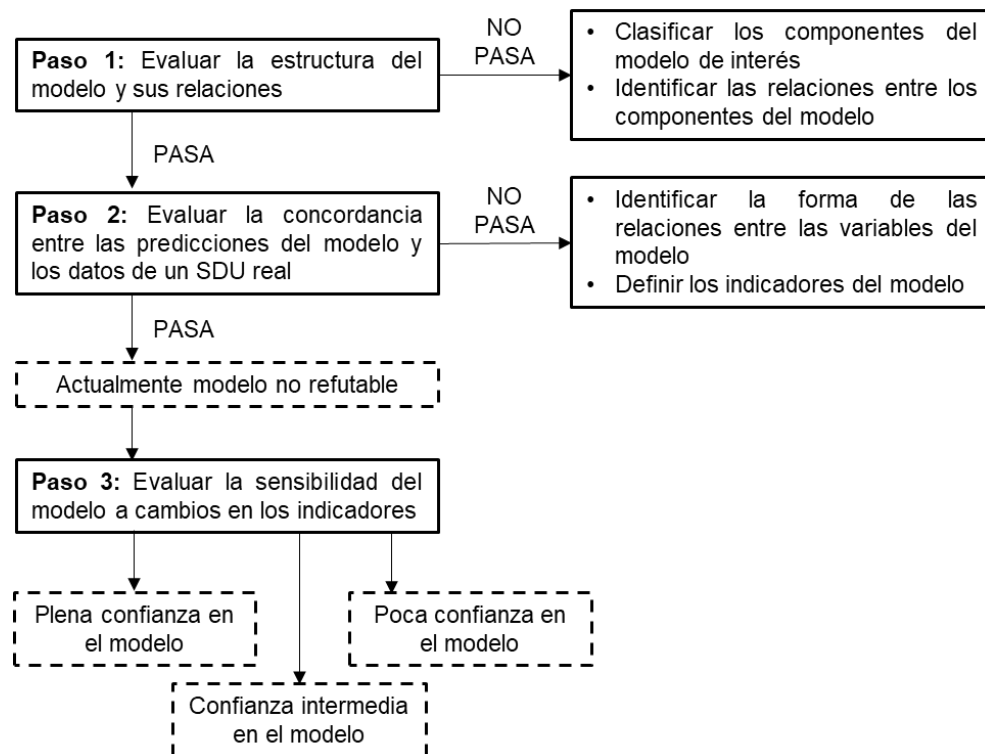


Figura 5.1 Pasos para la evaluación de un modelo conceptual

Fuente: Adaptado de Wang y Grant (2019)

En el primer paso se evalúa la estructura del modelo y las relaciones entre sus elementos en términos de su objetivo mediante su aplicación en un SDU real verificando que los resultados sean representativos del SDU real. Si algún aspecto de la estructura del modelo o alguna de las relaciones aparece como una representación inadecuada del sistema real, entonces esa parte particular del modelo se rechaza (Wang y Grant, 2019). Los criterios para rechazar un aspecto o relación pueden ser cualitativos o cuantitativos, dependiendo de los objetivos del modelo y del tipo de información disponible acerca del SDU real.

El segundo paso consiste en evaluar la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos de un SDU real. La forma en que se revisa la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos para el caso de un SDU real depende del tipo de predicciones en que se está interesado (simulación por eventos de inundación) (Sánchez, 2010).

El tercer paso consiste en evaluar la sensibilidad del comportamiento del modelo a cambios en sus indicadores (Wang y Grant, 2019). El procedimiento básico consiste en una serie de simulaciones en las cuales se cambia el valor de un indicador del modelo para una simulación dada y se observa el efecto subsecuente de este cambio sobre el comportamiento del modelo (Jørgensen y Brian, 2011; Wang y Grant, 2019). El mismo procedimiento se realiza con cada uno de los indicadores que se decida incluir en este análisis. Este procedimiento se puede modificar para cambiar simultáneamente un conjunto de indicadores.

Identificar aquellos indicadores en los cuales el modelo es más sensible, provee un criterio de la precisión con que debería estimarse cada indicador (Jackson *et al.*, 2000). Esta información permite determinar el grado de confianza que se puede tener en el modelo, con base en la confianza con la cual se han estimado los indicadores y las relaciones que tienen mayor influencia sobre el comportamiento del modelo (Wang y Grant, 2019). Esta información también es útil para establecer prioridades en cuanto a la información adicional que se necesita recolectar en investigaciones futuras para mejorar el modelo.

Para evaluar el efecto producido sobre el comportamiento del modelo si se cambian ciertos indicadores, se debe identificar aquellos aspectos del modelo en los que se está interesado, los cuales dependen de los objetivos del modelo (Jørgensen y Brian, 2011). En general, existen diferentes metodologías para la evaluación de la sensibilidad aplicables a un modelo conceptual como el desarrollado (van Waveren *et al.*, 1999; Saltelli *et al.*, 2002):

- *Variación individual de un número de indicadores supuestamente independientes:* En esta metodología, los indicadores se cambian uno por uno. La principal desventaja de este método es que no se presta atención a los efectos de la correlación entre los indicadores.
- *Análisis de sensibilidad clásico:* El modelo se linealiza entorno a los valores nominales de los indicadores, de modo que la derivada de un indicador se puede rastrear en una sola ejecución en cualquier momento y para cualquier variable de estado, a fin de que la sensibilidad del modelo pueda ser simplemente determinada. Este método solo es aplicable si los indicadores pueden desviarse muy poco del valor nominal donde el resultado dependerá en gran medida del valor nominal elegido. Otra desventaja es que apenas se tienen en cuenta las correlaciones entre indicadores.
- *Simulaciones estocásticas de Monte Carlo:* Todos los indicadores a variar se muestrean simultáneamente a partir de su distribución estadística, por lo tanto no sistemáticamente. Se requiere un número relativamente grande de ejecuciones y posteriormente se aplica la regresión lineal para determinar la relación entre los resultados del modelo y los indicadores. A diferencia del análisis de sensibilidad clásico, no es necesario hacer suposiciones de antemano con respecto a la linealidad. Las simulaciones de Monte Carlo también permiten hacer un análisis de los indicadores correlacionados.

La interpretación de los resultados del tercer paso difiere a la interpretación de los resultados de los pasos anteriores. En los pasos uno y dos se intenta verificar la coherencia del modelo. Mientras que, a través de la evaluación de la sensibilidad, en cambio, se trata de verificar más claramente el nivel de confianza del modelo para responder a cambios. Si el modelo es coherente durante los primeros dos pasos del procedimiento de la evaluación, se debe considerar no refutable, con base en el conocimiento actual del SDU real (Jørgensen y Brian, 2011; Wang y Grant, 2019).

5.2 METODOLOGÍA

La metodología empleada para evaluar el modelo conceptual en un SDU se sintetiza en la Figura 5.2. En ella se resalta en verde las herramientas metodológicas que se emplearon y en azul las pasos generales para la evaluación del modelo conceptual.

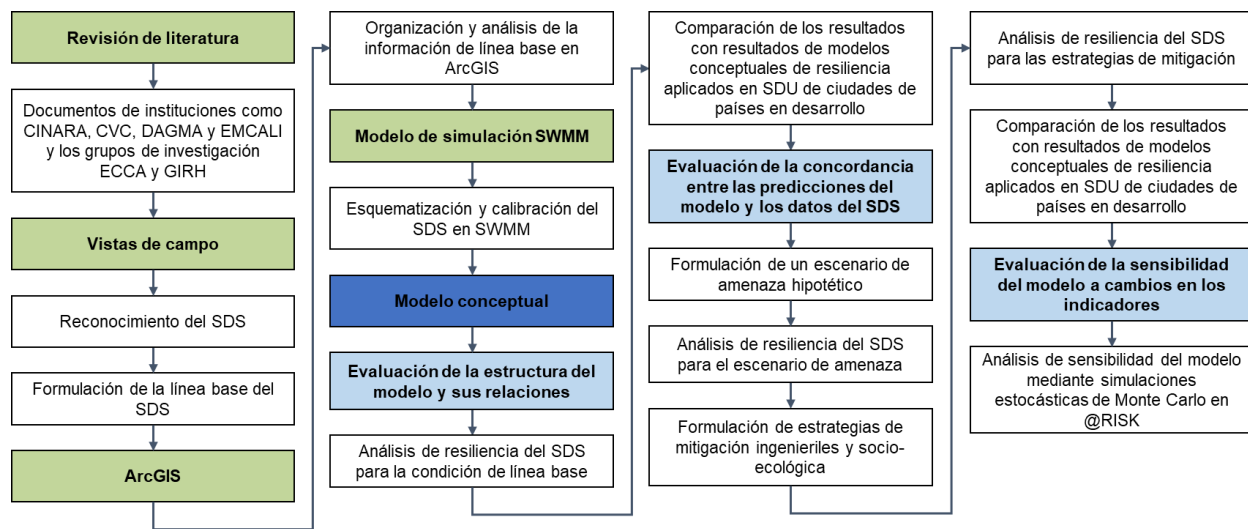


Figura 5.2 Metodología empleada para evaluar el modelo conceptual en un SDU

5.2.1 Descripción del área de estudio

Se empleó como área de estudio el Sistema de Drenaje Sur (SDS) de la ciudad de Cali, el cual está conformado por las subcuencas de los ríos Cañaveralejo, Lili y Meléndez y el Canal Ferrocarril, y se localiza al suroccidente de la ciudad de Cali en la cuenca alta del río Cauca, en el flanco oriental de la cordillera Occidental; esta área se caracteriza porque el cauce natural de los ríos Cañaveralejo, Lili y Meléndez fue modificado por la construcción del Canal Sur, el cual recoge sus aguas y las entrega al río Cauca en el sector de Navarro, el SDS funciona por gravedad drenando las aguas de escorrentía urbana y residuales de la zona sur de la ciudad por redes de alcantarillado combinado y separado.

La parte alta del SDS se encuentra dentro del complejo ecosistémico del Parque Nacional Natural Farallones de Cali y es de gran importancia estratégica debido a su potencial en recursos hídricos, biodiversidad, regulación del clima, de suelos y socioeconómica; el potencial hídrico de la cuenca ha permitido la ejecución de soluciones de agua para varios corregimientos, parcelaciones del sector y una parte del área de ladera en el casco urbano de la ciudad de Cali (DAGMA, 2009; CVC, 2019). La cuenca hidrográfica posee un área aproximada de 74,6 km² de la cual 11,5 km² pertenecen a la subcuenca Cañaveralejo, 16,0 km² a la subcuenca Lili, 37,4 km² a la subcuenca Meléndez y 9,7 km² a la subcuenca Ferrocarril. El tiempo de concentración del SDS es de 2,4 horas aproximadamente (Alvis *et al.*, 2016). El 51% del área es urbana y el 49% es rural, con alturas a partir del cauce del río Cauca de 950 msnm, hasta los 3100 msnm, en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali.

En la Figura 5.3 se muestran los principales componentes del SDS de la ciudad de Cali incluidas las estaciones meteorológicas que se especifican en la Tabla 5.1.

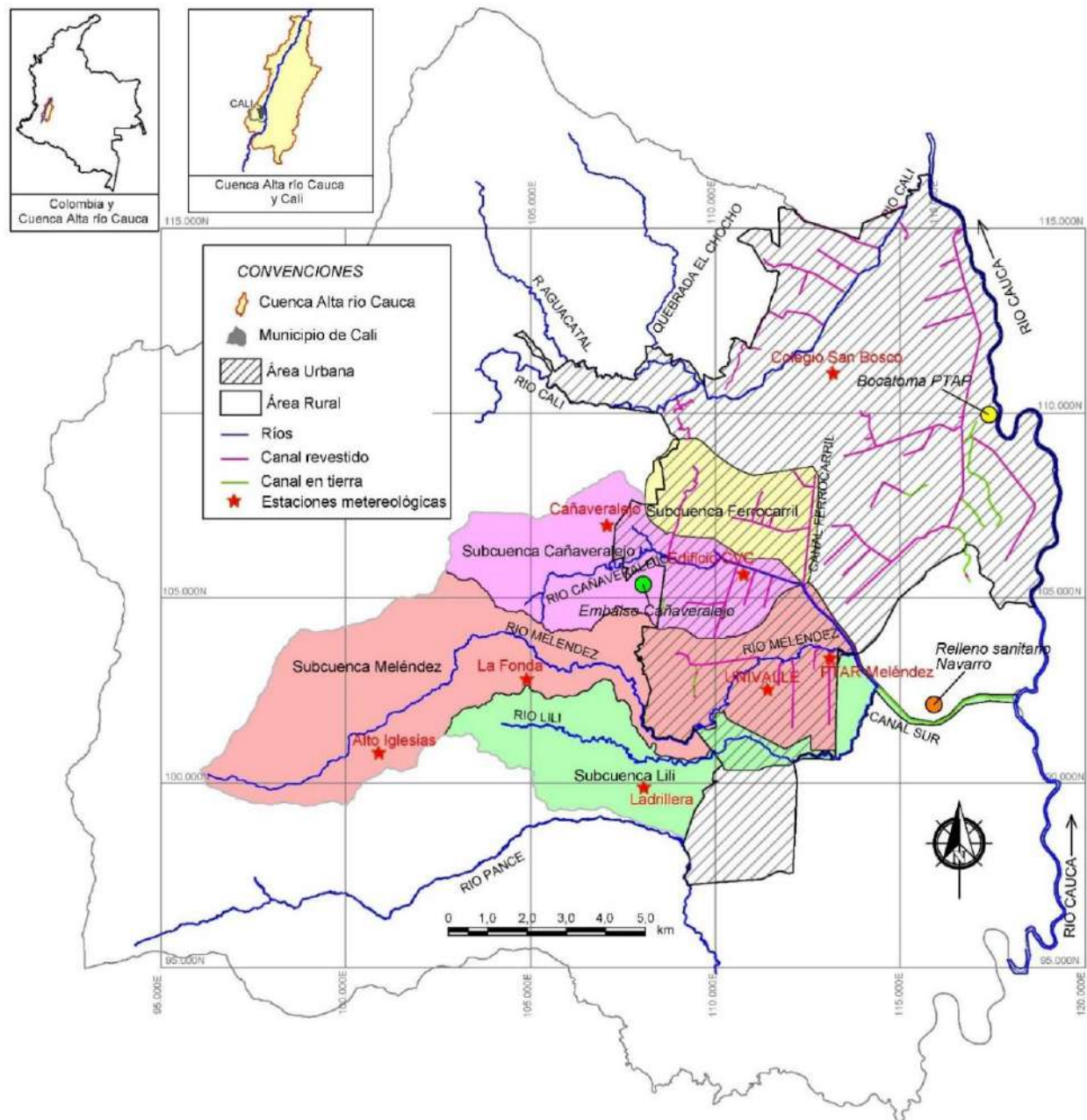


Figura 5.3 SDS de la ciudad de Cali

Fuente: Adaptado de DAPM (2014) y CVC (2019)

Tabla 5.1 Estaciones meteorológicas ubicadas en el SDS de Cali

Subcuenca	Categoría	Nombre	Entidad	Altitud (msnm)	Fecha de instalación
Cañaveral	Pluviométrica	Cañaveral	CVC	1056	01/02/1968
		Edificio CVC		985	01/03/1984
Lili		Ladrillera		1180	01/11/1982
		Alto Iglesias		1705	01/02/1981
		La Fonda		1058	01/12/1964
Meléndez	Climatológica	PTAR- Meléndez	DAGMA	980	01/12/2014
		UNIVALLE	IDEAM	985	15/12/1965
Ferrocarril	Pluviométrica	Colegio San Bosco	CVC	1000	01/04/1960

Las autoridades a cargo del SDS son la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) responsable de los asuntos ambientales de la zona rural, el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) responsable de los asuntos ambientales de la zona urbana, la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN) responsable de los asuntos ambientales en la cuenca alta del río Meléndez y las Empresas Municipales de Cali (EMCALI) responsables de la planeación, construcción, operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado.

El principal canal de transporte del SDS es el Canal Sur cuya longitud es de 7730 m y tiene una profundidad promedio de 6 m. El Canal Sur transporta todas las aguas de escorrentía urbana y residuales recolectadas en el SDS para finalmente descargarlas al río Cauca. En este sentido la subcuenca del río Cañaveralejo aporta aproximadamente el 41% de las aguas residuales del SDS, seguido de las subcuencas de los ríos Lili y Meléndez con un 34% y finalmente el Canal Ferrocarril con un 25% (EMCALI, 2016). En el SDS se ubica el embalse de Cañaveralejo que tiene un área de 78492 m², el cual es un sistema artificial de regulación cuyo objetivo es amortiguar los picos de caudal que aparecen durante la temporada invernal en el río Cañaveralejo y así mitigar las inundaciones en zonas cercanas.

De acuerdo con el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica de los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo (POMCA-LMC) (CVC, 2019), la precipitación en el SDS tiene un ciclo bimodal con dos temporadas lluviosas (abril-mayo y octubre-noviembre) y dos temporadas secas (diciembre-febrero y junio-agosto), que resultan de la traslación latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), donde la zona norte del SDS presenta las menores precipitaciones (estación Colegio San Bosco) y en la zona sur se incrementan las precipitaciones (estaciones Edificio CVC y UNIVALLE). Además, la precipitación es influenciada por la elevación, donde las estaciones ubicadas en la zona rural presentan mayores precipitaciones con respecto a los registros de las estaciones de la zona urbana.

En la parte alta del SDS se presentan temperaturas del orden de los 16 °C, mientras que en la zona baja la máxima temperatura es de aproximadamente 31 °C. El SDS tiene una temperatura media mensual multianual mínima de 29 °C (noviembre) y una temperatura media mensual multianual máxima de 31 °C (agosto). La evaporación presenta un ciclo bimodal coincidente con la temporada de lluvias del año, con los menores valores en el ciclo hacia noviembre (100 mm) y mayores valores en agosto (140 mm) registrados en la estación UNIVALLE (CVC, 2019). El SDS aporta un caudal promedio durante periodo seco de 1,71 m³/s al río Cauca de los cuales el 70% proviene del río Cañaveralejo y Canal Ferrocarril y el 30% proviene de los ríos Lili y Meléndez (EMCALI, 2016).

En la Tabla 5.2 se presentan los caudales máximos para diferentes Periodos de Retorno (TR) en las diferentes subcuencas del SDS.

Tabla 5.2 Caudales máximos en el SDS de Cali (m³/s)

Subcuenca	Sitio de control	TR (años)				
		5	10	20	50	100
Cañaveralejo	El Jardín	38,65	38,65	70,60	88,75	116,31
	Aguas arriba del embalse de Cañaveralejo	46,46	50,13	84,98	90,61	193,55
	Embalse de Cañaveralejo	47,65	50,07	78,98	92,48	164,78
	Quebrada Aguarruz	34,60	37,90	44,91	50,33	56,47
Lili	Pasoancho	63,64	88,38	132,97	178,93	239,37
	Avenida Simón Bolívar	73,85	103,14	150,59	198,53	260,83
	Calle 53	78,08	81,41	83,93	86,25	88,93
Meléndez	Confluencia Canal Nápoles	64,98	88,18	133,19	184,99	258,51
	Confluencia Canal Ingenio II	69,55	91,31	136,80	189,41	263,49
	Confluencia Canal Ingenio III	76,36	93,90	139,98	193,11	267,85
	Confluencia Canal Comfandi	79,60	95,05	141,28	194,66	270,01
	Confluencia Canal Caney	97,34	115,08	150,54	204,28	281,29
Ferrocarril	Desembocadura Canal Sur	90,65	112,71	150,51	187,42	233,37

Fuente: CVC (2019)

El SDS presenta problemas asociados a una gestión inadecuada del drenaje urbano, en este sentido desde comienzos de la década de los años 90's, se han incrementado los eventos de inundación en las diferentes subcuencas que lo conforman, lo que está asociado principalmente a problemas como pérdida de vegetación nativa; deforestación; asentamientos informales en la ladera, los cuales se encuentran en riesgo de situaciones de deslizamiento y generan aportes de caudales mayores, que llegan rápidamente a la cuenca baja, ocasionando un deslave en el área que contribuye a la progresiva erosión de los terrenos, a la sedimentación de canales y ríos; invasión de las márgenes de protección; derrumbes en las riberas del río e incremento de caudales de escorrentía por cambios en el uso del suelo (Soto, 2011; CVC, 2019).

El SDS también presenta problemas ambientales como erosión y actividad minera ilegal en las partes altas de las cuencas, mal funcionamiento del embalse de Cañaveralejo, contaminación por residuos sólidos (basuras, escombros y sedimentos), vegetación en los canales, contaminación por problemas del funcionamiento de la red de alcantarillado; problemas sociales como: asentamientos de desarrollo informal en las partes altas, expansión urbanística ilegal y conflictos de interés en áreas de alta valorización; y problemas institucionales como: dificultad de articulación institucional lo cual ha conducido al desarrollo de acciones puntuales de cada institución sin tener en cuenta un enfoque de cuenca, e imprecisiones en cuanto a la delimitación específica entre la parte rural y urbana, generando conflictos de competencias de las autoridades para la asignación de responsabilidades y recursos económicos (EMCALI, 2016; CVC, 2019).

Estos problemas también fueron identificados por profesionales de instituciones del sector agua y saneamiento y representantes de la comunidad del SDS en el Seminario Taller: *El Sistema de Drenaje Sur del Municipio de Cali: En la búsqueda de estrategias para una gestión sostenible y resiliente*, realizado el 26 de mayo de 2017 en la ciudad de Cali.

En la Figura 5.4 se muestran fotografías que evidencian algunos de estos problemas asociados a la gestión inadecuada del drenaje urbano del SDS.



Figura 5.4 Problemas asociados a la gestión inadecuada del drenaje urbano del SDS de Cali (a) Sedimentos en el Canal Sur; (b) Inundación en la cuenca baja del río Meléndez sector El Ingenio; (c) Residuos sólidos en el Canal Sur; y (d) Asentamientos informales en la cuenca alta del río Meléndez sector Las Palmas

Fuente: Archivo fotográfico de EMCALI y El País Cali

5.2.2 Esquematización y calibración en SWMM del Sistema de Drenaje Sur (SDS) de Cali

La esquematización inició con la revisión de literatura gris en instituciones como CVC, DAGMA y EMCALI de trabajos desarrollados en toda la cuenca o en algunas de las subcuencas del SDS, y la revisión de trabajos de investigación realizados en los últimos doce años por el Instituto CINARA y los grupos de investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA) y Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) de la Universidad del Valle (Montaña, 2010; Martínez *et al.*, 2011; Castrillón, 2014; Alvis *et al.*, 2016; Barahona, 2018; Domínguez, 2018; Toledo, 2018); la revisión de literatura se complementó con el reconocimiento del SDS mediante visitas de campo. Con esta información se formuló una línea base (año 2021) que consideraba la información requerida por el modelo conceptual propuesto, la cual se organizó y analizó mediante el programa ArcGIS de Sistemas de Información Geográfica (SIG) desarrollado por *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) de Estados Unidos.

Con la información recopilada, se elaboró la esquematización de las áreas de drenaje y componentes de infraestructura del SDS en el modelo de gestión de aguas lluvias – *Storm Water Management Model* (SWMM), incluyendo aliviaderos, colectores principales combinados, sanitarios y pluviales, canales pluviales, los ríos Cañaveralejo, Lili y Meléndez y los canales Ferrocarril y Sur, obteniendo una red de 863 áreas con 12186 nodos, 12832 tramos, 50 aliviaderos y 8 estaciones pluviométricas. Las áreas de drenaje se definieron para el sistema de alcantarillado combinado y separado según la topografía, el uso del suelo y el área de influencia de los colectores y aliviaderos.

La esquematización en SWMM se realizó en el marco del Proyecto Gestión de la Resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano financiado por COLCIENCIAS (ahora MINCIENCIAS) mediante el trabajo de grado de pregrado desarrollado por Barahona (2018), y los trabajos de grado de maestría desarrollados por Domínguez (2018) y Toledo (2018).

Para realizar la esquematización en SWMM se cruzaron capas de SIG con información sobre la clasificación de actividades por zonas y coberturas de usos del suelo de la cuenca. La información sobre la infraestructura del alcantarillado se obtuvo del catastro de redes de alcantarillado combinado y separado de EMCALI, el catastro de redes corresponde a archivos en formato ESRI *Shapefile* del año 2015. Para tener una esquematización más realista del SDS se consideró un porcentaje de reducción de la capacidad hidráulica del 35%, 17%, 34% y 32% en los ríos Cañaveralejo, Lili y Meléndez y el canal Ferrocarril respectivamente, estos porcentajes se obtuvieron del volumen promedio anual de residuos sólidos retirados por EMCALI en los ríos y canales del SDS en relación con su volumen útil (EMCALI, 2016).

La información disponible presentó limitaciones para hacer una calibración rigurosa de todos los parámetros de las componentes hidrológica (bloque RUNOFF) e hidrodinámica (bloques TRANSPORT y EXTRAN) del modelo SWMM. Por lo cual, se optó por adoptar los resultados de calibración obtenidos en estudios desarrollados en la subcuenca del río Cañaveralejo por Barahona (2018) y la subcuenca del río Meléndez por Toledo (2018), para de allí tomar los parámetros de calibración a utilizar del SDS en su conjunto.

El estudio desarrollado por Barahona (2018) empleó las metodologías *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE) y *Shuffled Complex Evolution* (SCE), utilizando como medida de ajuste el coeficiente de *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) obteniendo un valor de NSE de 0,90 para el método GLUE y 0,93 para el método SCE. El estudio desarrollado por Toledo (2018) empleó una metodología *ad hoc* de calibración/verificación en modelos determinísticos de drenaje urbano obteniendo un valor de NSE de 0,98. Valores de NSE cercanos a 1, indican que los datos se ajustan adecuadamente (Gupta *et al.*, 2009).

En la Figura 5.5 se presenta la esquematización en SWMM del SDS.

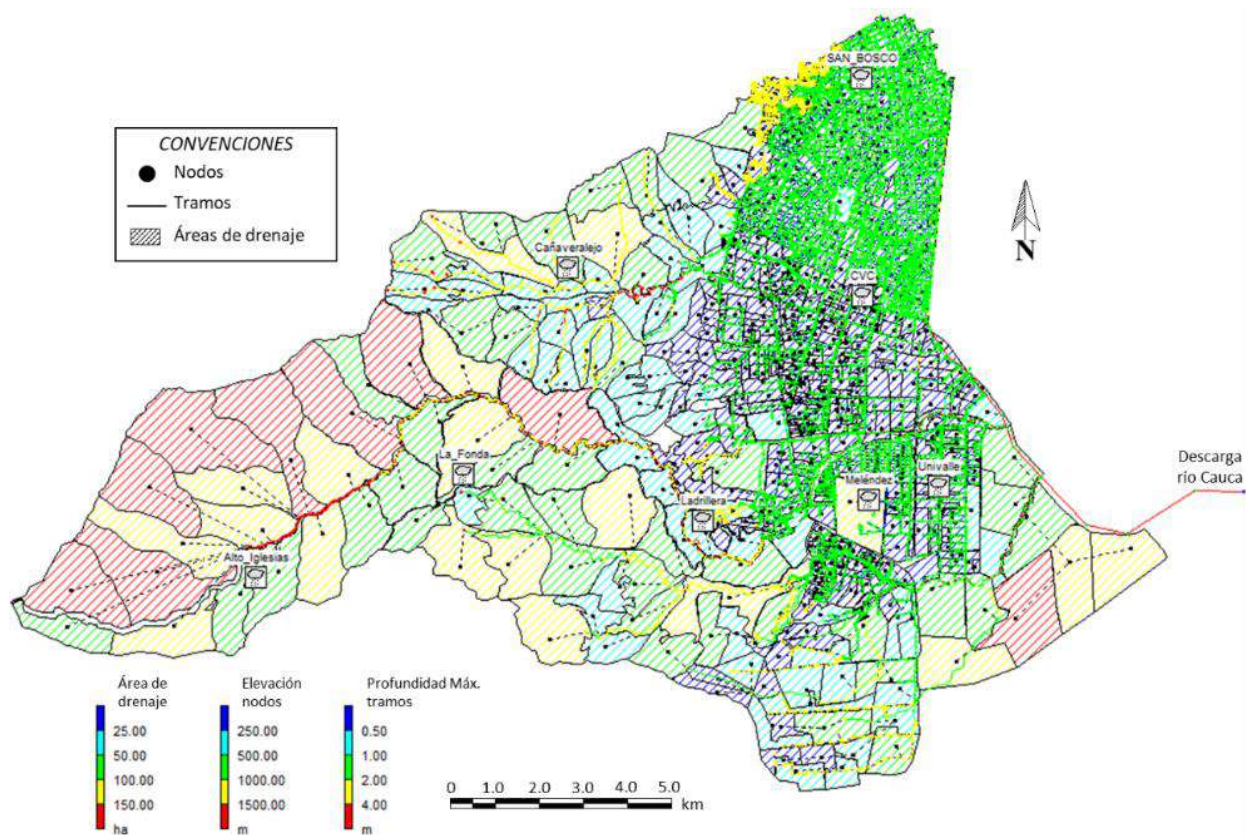


Figura 5.5 Esquemmatización en SWMM del SDS de Cali

5.2.3 Evaluación del modelo conceptual en el Sistema de Drenaje Sur (SDS) de Cali

Una vez se tuvo la línea base y el SDS esquematizado y calibrado en SWMM, se evaluó el modelo conceptual propuesto, siguiendo los tres pasos sugeridos por Wang y Grant (2019) consistente en evaluar: *i.* La estructura del modelo y sus relaciones; *ii.* La concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del SDS; y *iii.* La sensibilidad del modelo a cambios en los indicadores.

i. Evaluación de la estructura del modelo y sus relaciones. En el primer paso, se evaluó el modelo conceptual en el SDS verificando que los resultados fueran representativos para este SDU. Para ello se realizó un análisis de RI, RSE y Resiliencia Integral (IR) del SDS en su condición de línea base.

El análisis de RI para la condición de línea base se desarrolló en SWMM simulando para la función básica caudales con un TR de 10 años en los ríos Cañaveralejo, Lili y Meléndez y en los canales Ferrocarril y Sur, y un nivel de agua con un TR de 10 años en el río Cauca, que es el receptor final del SDS y su influencia sobre este SDU depende su nivel; cuando es relativamente alto, asociado a un TR mayor a 10 años (Delgado *et al.*, 2007), genera contraflujo y represamiento en el Canal Sur influyendo en los niveles y caudales del SDS.

Para la función complementaria se simulaban eventos extremos de lluvia reales registrados el 22 de marzo de 2021 con duraciones de 60 minutos (Figura 5.6), fecha en la cual se presentó la mayor emergencia invernal en la ciudad de Cali durante el año 2021 (El_Espectador, 2021; El_País, 2021; El_Tiempo, 2021; Semana, 2021). Se seleccionaron estos eventos de lluvia porque la resiliencia se enfoca principalmente en reducir el riesgo ocasionado por eventos extremos de riesgo medio o alto (Mueller y Stewart, 2016), por lo cual emplear eventos de lluvia de menor intensidad no permitiría obtener resultados de RI confiables.

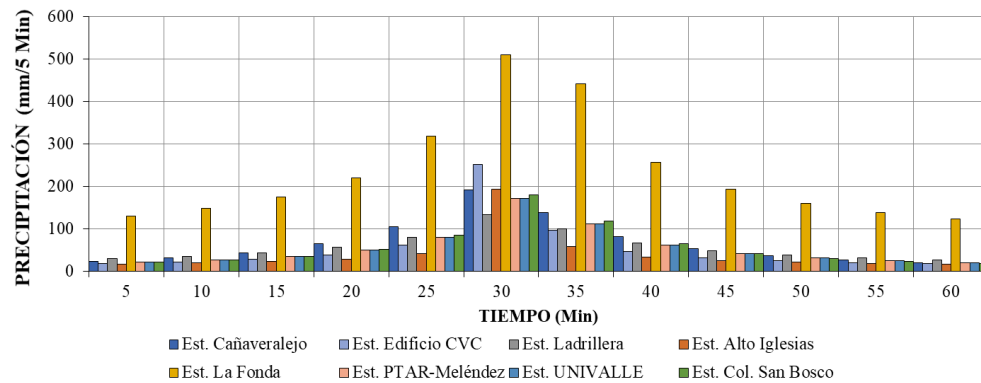


Figura 5.6 Eventos de lluvia observados en el SDS de Cali el 22/03/2021

Fuente: Registros pluviométricos de la CVC (2021), DAGMA (2021) e IDEAM (2021)

En el análisis de RSE para la condición de línea base se empleó para los valores de los indicadores de RSE información de estudios realizados por instituciones del gobierno local como la Contraloría General de Santiago de Cali (CGSC), el Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Cali (DAPM) y EMCALI; una entidad regional como la CVC; y una entidad nacional como el Departamento Nacional de Estadística (DANE) (Tabla 5.3).

Tabla 5.3 Información considerada en los indicadores de RSE para analizar la resiliencia del SDS de Cali en la condición de línea base

Indicadores de RSE	Subcuencas				Fuente
	Cañavalejo	Lili	Meléndez	Ferrocarril	
2.1. Nivel de coordinación institucional	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	CGSC (2019)
2.2. Porcentaje de asentamientos informales	AI = 13217/31470 AI = 42%	AI = 20/2047 AI = 1%	AI = 14203/78905 AI = 18%	AI = 7152/42072 AI = 17%	DAPM (2014)
3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	AZRAI = 0,7 km ² /5,9 km ² AZRAI = 12%	AZRAI = 0,1 km ² /8,2 km ² AZRAI = 1%	AZRAI = 0,6 km ² /19,1 km ² AZRAI = 3%	AZRAI = 0,1 km ² /4,9 km ² AZRAI = 2%	CVC (2019)
4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	RS = 29930 m ³ /85514 m ³ RS = 35%	RS = 36595 m ³ /215264 m ³ RS = 17%	RS = 90436 m ³ /265987 m ³ RS = 34%	RS = 24066 m ³ /75206 m ³ RS = 32%	EMCALI (2016)
5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	NBI = 6609/31470 NBI = 21%	NBI = 20/2047 NBI = 1%	NBI = 16570/78905 NBI = 21%	NBI = 8414/42072 NBI = 20%	DANE (2018)
6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	PT = 5%	PT = 3%	PT = 4%	PT = 6%	CVC (2019)
6.2. Porcentaje de área impermeable	AI = 40%	AI = 35%	AI = 20%	AI = 61%	DAPM (2014)
7.1. Porcentaje de áreas verdes	AV = 0,3 km ² /5,9 km ² AV = 5%	AV = 0,5 km ² /8,2 km ² AV = 6%	AV = 1,9 km ² /19,1 km ² AV = 10%	AV = 0,2 km ² /4,9 km ² AV = 4%	DAPM (2014)
7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	ACH = 0,1 km ² /5,9 km ² ACH = 2%	ACH = 0,2 km ² /8,2 km ² ACH = 2%	ACH = 0,9 km ² /19,1 km ² ACH = 5%	ACH = 0,1 km ² /4,9 km ² ACH = 2%	DAPM (2014)

Para obtener los valores de los indicadores de RSE del SDS en conjunto se empleó la Ecuación 5.1:

$$SDS = \frac{\sum_{i=1}^n A_i I_i}{A_{SDS}} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde A_i es el área de cada subcuenca, A_{SDS} es el área total del SDS y I_i es el valor del indicador de RSE en cada subcuenca.

Los resultados del análisis de resiliencia del SDS para la condición de línea base se compararon con resultados obtenidos en modelos conceptuales de resiliencia identificados en la Tabla 2.4 del Capítulo 2, aplicados en SDU de ciudades de países en desarrollo (Mugume *et al.*, 2015b; Kotzee y Reyers, 2016; Qasim *et al.*, 2016; Binesh *et al.*, 2018; Moghadas *et al.*, 2019; Rezende *et al.*, 2019b). Esta comparación permitió confrontar los resultados obtenidos del modelo conceptual desarrollado para la condición de línea base con resultados de modelos de resiliencia aplicados en SDU similares al SDS.

ii. Evaluación de la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del SDS. En el segundo paso, se formuló un escenario de amenaza hipotético consistente en la reducción en un 50% de la permeabilidad del suelo, las áreas verdes y las áreas de cuerpos hídricos en relación con la condición de línea base. Este escenario de amenaza se seleccionó porque es común en SDU de países en desarrollo (Parkinson y Mark, 2015), ocurre frecuentemente en el SDS de acuerdo con los problemas de gestión inadecuada del drenaje urbano previamente descritos y es sencillo de implementar en el modelo SWMM.

Para mejorar la resiliencia del SDS se formuló una estrategia de mitigación ingenieril de *recursividad* consistente en la limpieza del 100% de residuos sólidos (basuras, escombros y sedimentos) en canales y ríos; una estrategia ingenieril de *redundancia* consistente en cuatro embalses ubicados en los puntos más críticos de cada subcuenca, cada uno con un volumen de almacenamiento equivalente al 10% del volumen total de inundación de cada subcuenca en la condición de línea base; y una estrategia de mitigación socio-ecológica de reglamentación de los usos del suelo considerando un incremento del 50% en el área permeable, las áreas verdes y las áreas de cuerpos hídricos en relación con la condición de línea base.

En la Tabla 5.4 se presenta la información considerada en los indicadores de RI y RSE para analizar la resiliencia del SDS frente al escenario de amenaza y las estrategias de mitigación.

Tabla 5.4 Información considerada en los indicadores para analizar la resiliencia del SDS de Cali frente al escenario de amenaza y las estrategias de mitigación

Condición	Indicadores	Subcuencas			
		Cañavalejo	Lili	Meléndez	Ferrocarril
Escenario de amenaza: Reducción de la permeabilidad del suelo	1.1. RI por inundaciones	Reducción del 50% en el porcentaje de área permeable	Reducción del 50% en el porcentaje de área permeable	Reducción del 50% en el porcentaje de área permeable	Reducción del 50% en el porcentaje de área permeable
	6.2. Porcentaje de área impermeable	AI = 60%	AI = 52%	AI = 30%	AI = 91%
	7.1. Porcentaje de áreas verdes	AV = 2%	AV = 3%	AV = 5%	AV = 2%
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	ACH = 1%	ACH = 1%	ACH = 2%	ACH = 1%
Estrategia ingenieril de recursividad: Limpieza de canales y ríos	1.1. RI por inundaciones	SDU limpio con una capacidad hidráulica del 100%	SDU limpio con una capacidad hidráulica del 100%	SDU limpio con una capacidad hidráulica del 100%	SDU limpio con una capacidad hidráulica del 100%
Estrategia ingenieril de redundancia: Embalses en los puntos más críticos de cada subcuenca	1.1. RI por inundaciones	Embalse con un volumen de $86,9 \times 10^3 \text{ m}^3$	Embalse con un volumen de $8,09 \times 10^3 \text{ m}^3$	Embalse con un volumen de $113,5 \times 10^3 \text{ m}^3$	Embalse con un volumen de $32,0 \times 10^3 \text{ m}^3$
Estrategia socio-ecológica: Reglamentación en los usos del suelo	6.2. Porcentaje de área impermeable	AI = 20%	AI = 17%	AI = 10%	AI = 30%
	7.1. Porcentaje de áreas verdes	AV = 7%	AV = 9%	AV = 15%	AV = 6%
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	ACH = 3%	ACH = 3%	ACH = 7%	ACH = 3%

Los resultados del análisis de resiliencia del SDS para el escenario de amenaza y las estrategias de mitigación nuevamente se compararon con resultados obtenidos en modelos conceptuales de resiliencia identificados en la Tabla 2.4 del Capítulo 2 que evaluaron escenarios de amenaza e incorporaron estrategias de mitigación ingenieriles aplicados en SDU de ciudades de países en desarrollo (Mugume *et al.*, 2015b; Binesh *et al.*, 2018; Rezende *et al.*, 2019b). Esta comparación permitió confrontar las predicciones del modelo conceptual desarrollado con resultados de modelos de resiliencia aplicados en SDU similares al SDS.

La evaluación del modelo conceptual realizada en los pasos uno y dos, se efectuó para el SDS en conjunto y sus subcuencas individualmente teniendo en cuenta la RI, RSE y el índice IR para mostrar el efecto de considerar solo la RI y RSE versus el efecto de considerar los dos enfoques de resiliencia de forma integrada.

Cada simulación en SWMM considerando el alto nivel de detalle de la esquematización del SDS tardó 1.5 horas corriendo en un computador con un procesador Intel® Core™ i7 de 2 núcleos a una velocidad de 2,50 GHz, memoria RAM de 12 GB y Unidad de Estado Sólido – *Solid State Drive* (SSD) de 512 GB.

En los Anexos se presentan las hojas de cálculo desarrolladas en Microsoft Excel para cuantificar el índice IR del SDS y sus subcuencas para la condición de línea base, el escenario de amenaza y las estrategias de mitigación propuestas.

iii. Evaluación de la sensibilidad del modelo a cambios en los indicadores. En el tercer paso, se evaluó la sensibilidad del modelo a cambios en los indicadores. Para tal fin, se empleó el software @RISK desarrollado por Palisade, que permite realizar simulaciones de Monte Carlo con las que se puede analizar la sensibilidad de diferentes modelos conceptuales desarrollados en Microsoft Excel (Lehman y Groenendaal, 2020). Con este software se realizaron 100000 simulaciones utilizando el generador de números pseudoaleatorios de Mersenne Twister.

Con el software @RISK se generaron gráficas del coeficiente de correlación de Spearman, la sensibilidad de los indicadores con respecto a la contribución a la varianza y la incertidumbre de los indicadores con respecto a la media, adicionalmente se generaron diagramas de dispersión de los indicadores en términos del índice IR. La evaluación de la sensibilidad también permitió identificar el peso más adecuado de la RI y RSE considerando las correlaciones entre los indicadores de estos dos enfoques de resiliencia.

Para realizar las simulaciones de Monte Carlo, se definieron distribuciones uniformes para los indicadores que presentan valores con igual probabilidad y distribuciones de tipo *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) para los demás indicadores. La distribución PERT se recomienda para indicadores que no cuentan con registros históricos (Ang y Tang, 2007), como es el caso de los indicadores del modelo conceptual desarrollado. Los parámetros estadísticos de la distribución uniforme son el valor mínimo y el valor máximo, mientras que los parámetros de la distribución PERT son el valor mínimo, el valor máximo y el valor más probable, los valores de estos parámetros se definieron mediante revisión de literatura.

La Tabla 5.5 muestra las distribuciones de probabilidad seleccionadas para cada indicador con sus respectivos parámetros de distribución.

Tabla 5.5 Distribuciones de probabilidad asignadas a los indicadores

Indicadores	Distribución	Parámetros de distribución			Fuente
		Mínimo	Máximo	Más probable	
1.1. RI por inundaciones	Uniforme	0,3	0,7	-	-
2.1. Nivel de coordinación institucional	PERT	0	1	0,5	-
2.2. Porcentaje de asentamientos informales	PERT	0	60	28	DANE (2018)
3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	PERT	0	80	15	IDEAM (2018)
4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	Uniforme	0	50	-	SUPERSERVICIOS (2020)
5.1. Porcentaje de hogares con NBI	PERT	3	68	17	DANE (2018)
6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	Uniforme	0	25	-	IGAC (2021)
6.2. Porcentaje de área impermeable	Uniforme	0	80	-	IGAC (2021)
7.1. Porcentaje de áreas verdes	Uniforme	0	20	-	IGAC (2021)
7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	Uniforme	0	10	-	IGAC (2021)

5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1 Evaluación de la estructura del modelo conceptual y sus relaciones

En la Figura 5.7 se presentan los resultados de RI del SDS y sus subcuencas para la condición de línea base. Desde el punto de vista de la *flexibilidad* el SDS y las subcuencas Cañaveralejo, Meléndez y Ferrocarril colapsaron durante 40, 66, 121 y 38 minutos respectivamente, mientras que la subcuenca Lili no colapso presentando una mayor *flexibilidad* en comparación con las demás subcuencas. Con relación a la *robustez* los resultados también indican que para el SDS y las subcuencas Cañaveralejo, Meléndez y Ferrocarril se obtuvo una *robustez* igual a 0, mientras que para la subcuenca Lili fue de 0,82.

Los resultados también indican que el SDS tiene una RI moderada (entre 0,50 y 0,69) y las subcuencas Cañaveralejo, Meléndez y Ferrocarril tienen una RI baja (entre 0,30 y 0,49) las cuales de acuerdo con el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) de Cali (EMCALI, 2016) presentan fallas frecuentes en la red de alcantarillado que generan inundaciones, mientras que la subcuenca Lili presenta una RI alta (entre 0,70 y 0,89). Estos resultados obedecen a que la subcuenca Lili tiene una red de alcantarillado pluvial con una mayor capacidad hidráulica que permite mitigar mejor las inundaciones en comparación con las demás subcuencas del SDS, lo cual contribuye en parte a aumentar la RI del SDS.

En general, los resultados de RI son consistentes con el POMCA-LMC (CVC, 2019), el cual concluye que la duración y magnitud de las inundaciones que han ocurrido históricamente en el SDS han sido menores en la subcuenca Lili en comparación con las subcuencas Cañaveralejo, Meléndez y Ferrocarril. En este sentido, en el SDS se han presentado desde el año 1975 hasta el 2019 históricamente 407 eventos de inundación pluvial, de los cuales 102 ocurrieron en la subcuenca Cañaveralejo, 7 en Lili, 103 en Meléndez y 195 en Ferrocarril (CVC, 2019).

Los resultados de las simulaciones de los eventos de lluvia del 22 de marzo de 2021 también son consistentes con los informes realizados por medios de comunicación, los cuales reportaron que ese día se inundaron los barrios El Refugio, Camino Real, Pampalinda y El Seminario (subcuenca Cañaveralejo); El Templete y San Fernando (subcuenca Ferrocarril); y El Limonar (subcuenca Meléndez); con inundaciones que desbordaron los canales de la Carrera 50 y la Autopista Sur, cubriendo de agua las zonas aledañas de los Centros Comerciales Palmetto y Cosmocentro (subcuenca Cañaveralejo); y la Universidad del Valle (subcuenca Meléndez) (El_Espectador, 2021; El_País, 2021; El_Tiempo, 2021; Semana, 2021). Estos resultados demuestran la baja RI de las subcuencas Cañaveralejo, Meléndez y Ferrocarril frente a las inundaciones.

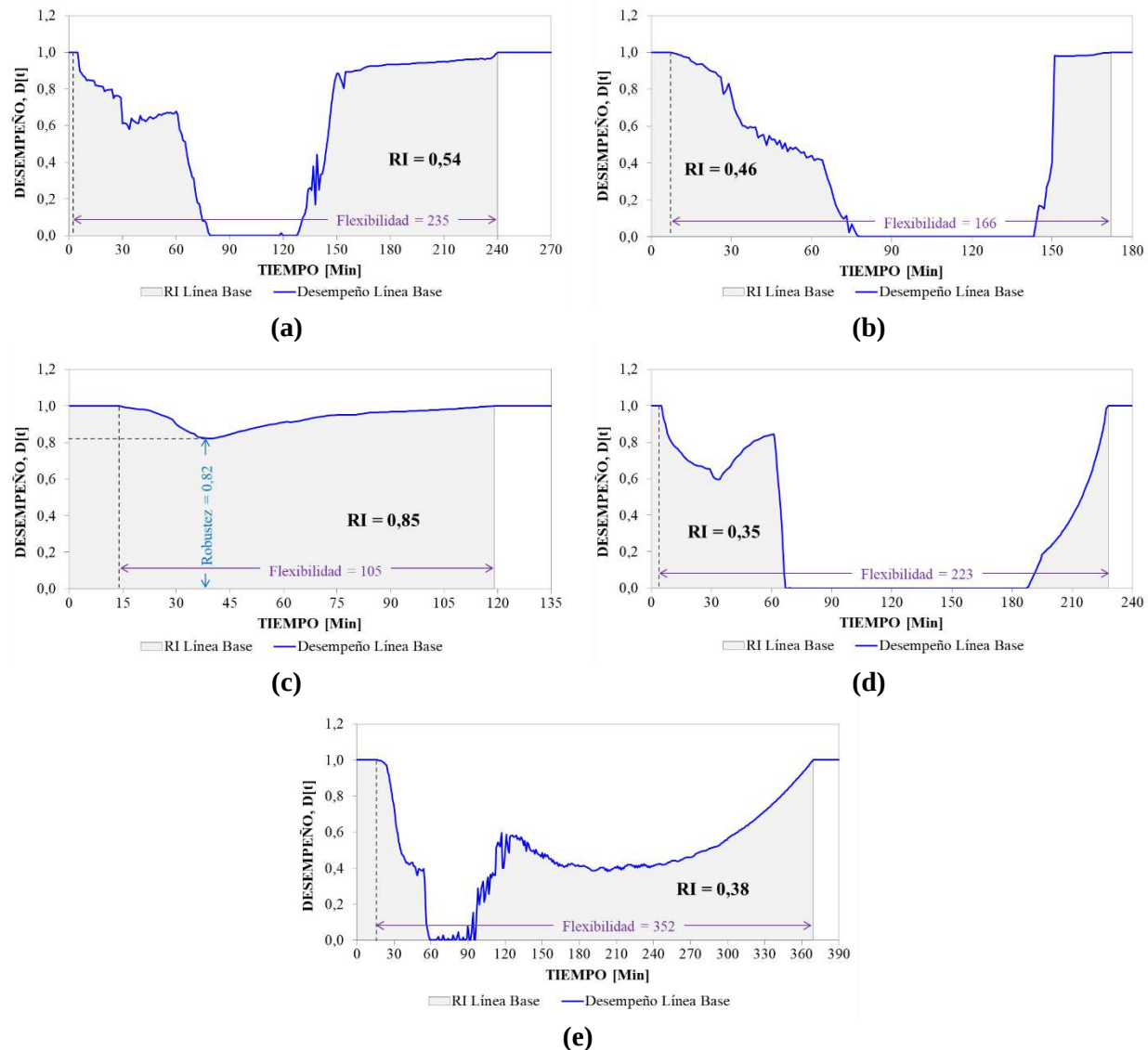


Figura 5.7 RI para la condición de línea base en: (a) SDS de Cali; y las subcuencas: (b) Cañaveralejo, (c) Lili, (d) Meléndez, y (e) Ferrocarril

La RSE del SDS y sus subcuencas para la condición de línea base se presenta en la Tabla 5.6 en la cual se observa que el SDS y las subcuencas Cañaveralejo, Meléndez y Ferrocarril tienen una RSE Baja (entre 0,30 y 0,49), mientras que la subcuenca Lili tiene una RSE moderada (entre 0,50 y 0,69). Para la condición de línea base se identificaron como variables críticas de RSE: la *gobernanza*, *residuos sólidos en el SDU*, *características físicas de la cuenca urbana* y *regulación de inundaciones*.

Estos resultados concuerdan con el POMCA-LMC (CVC, 2019), en el cual se indica que las subcuencas Cañaveralejo, Meléndez y Ferrocarril presentan principalmente problemas asociados a la falta de coordinación institucional, alta cantidad de residuos sólidos dispuestos inadecuadamente en canales y ríos, alta impermeabilidad del suelo y bajo porcentaje de áreas verdes y cuerpos hídricos, los cuales causan una RSE baja en estas subcuencas.

Estudios realizados para el diseño de obras de protección de inundaciones de los ríos Cañaveralejo, Lili y Meléndez (DAGMA, 1997, 2000), también corroboran que las subcuencas Cañaveralejo y Meléndez presentan un riesgo de inundación alto el cual causa una RSE baja, por lo que se recomienda la construcción de obras hidráulicas en estas subcuencas para la protección contra inundaciones tales como rectificación de

cauces mediante el dragado del fondo y los taludes de los ríos, aumentar el galibo de los puentes en puntos críticos, conformar diques con relleno de material compacto y en sectores donde no sea posible construir diques, construir muros de concreto reforzado.

Tabla 5.6 RSE del SDS de Cali y sus subcuencas para la condición de línea base

Factores, variables y RSE	SDS	Subcuencas			
		Cañaveralejo	Lili	Meléndez	Ferrocarril
Social	0,36	0,33	0,41	0,35	0,36
Gobernanza	0,05	0,04	0,06	0,05	0,05
Riesgo de inundación	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12
Residuos sólidos en el SDU	0,09	0,08	0,10	0,08	0,09
Desarrollo económico de la población	0,10	0,10	0,12	0,10	0,10
Ecológico	0,11	0,09	0,10	0,12	0,06
Características físicas de la cuenca urbana	0,09	0,08	0,09	0,11	0,06
Regulación de inundaciones	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
RSE	0,47	0,42	0,51	0,48	0,42
Calificación de la RSE	Baja	Baja	Moderada	Baja	Baja

Nota: Las variables críticas (menores a 0,10) se resaltaron en sombreado rojo claro con texto rojo oscuro

En la Figura 5.8 se presentan los resultados consolidados de resiliencia del SDS y sus subcuencas para la condición de línea base. También se indica mediante líneas a trazos los umbrales de resiliencia establecidos en la Tabla 4.8 del Capítulo 4.

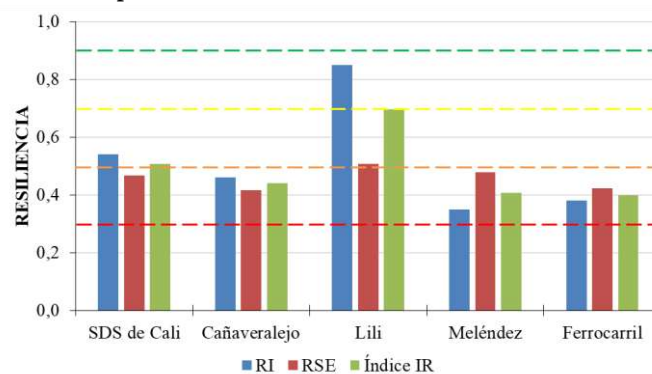


Figura 5.8 Resiliencia del SDS de Cali y sus subcuencas para la condición de línea base. Umbrales de Resiliencia muy baja (— — —); Resiliencia baja (— — —); Resiliencia moderada (— — —); y Resiliencia alta (— — —)

Los resultados indican que las subcuencas Cañaveralejo, Meléndez y Ferrocarril tienen una RI, RSE y un índice IR bajos (entre 0,30 y 0,49), mientras que la subcuenca Lili presenta una RI alta (entre 0,70 y 0,89) y una RSE y un índice IR moderados (entre 0,50 y 0,69). En consecuencia el SDS presenta una RI y un índice IR moderados (entre 0,50 y 0,69) y una RSE baja (entre 0,30 y 0,49).

Acorde con los resultados de RI y RSE para la condición de línea base se puede establecer que para mejorar el índice IR en el SDS es más adecuado incorporar en las subcuencas Meléndez y Ferrocarril estrategias de mitigación ingenieriles (ej., canalizaciones, diques, embalses, limpieza y/o mantenimiento de la infraestructura, etc.) por presentar una RI menor a la RSE, por el contrario las estrategias de mitigación más adecuadas para las subcuencas Cañaveralejo y Lili por presentar una RSE menor a la RI serían las socio-ecológicas (ej., educación ambiental, mejorar la coordinación institucional, normatividad, reglamentación en los usos del suelo, etc.).

Los resultados de RI para la condición de línea base del SDS y sus subcuencas son similares con los obtenidos en los modelos conceptuales desarrollados por Mugume *et al.* (2015b) evaluado en el SDU de la cuenca del río Nakivubo, Kampala, Uganda (RI menor a 0,80) y Binesh *et al.* (2018) evaluado en el SDU

del sector norte de Teherán, Irán (RI menor a 0,94). Por su parte, los resultados RSE concuerdan con los obtenidos en los modelos conceptuales de RSE evaluados en el SDU del distrito de Edén, Ciudad del Cabo, Sudáfrica (RSE menor a 0,70) (Kotzee y Reyers, 2016); los SDU de las ciudades de Charsadd, Nowshera y Peshawa, Provincia de Khyber Pukthunkhwa, Pakistán (RSE menor a 0,33) (Qasim *et al.*, 2016); el SDU de la ciudad de Teherán, Irán (RSE menor a 0,70) (Moghadas *et al.*, 2019); y el SDU de la cuenca del Canal do Mangue, Río de Janeiro, Brasil (RSE menor 0,50) (Rezende *et al.*, 2019b).

5.3.2 Evaluación de la concordancia entre las predicciones del modelo conceptual y los datos del Sistema de Drenaje Sur (SDS) de Cali

En la Figura 5.9 se presentan los resultados de RI del SDS y sus subcuencas para el escenario de amenaza de reducción de la permeabilidad del suelo.

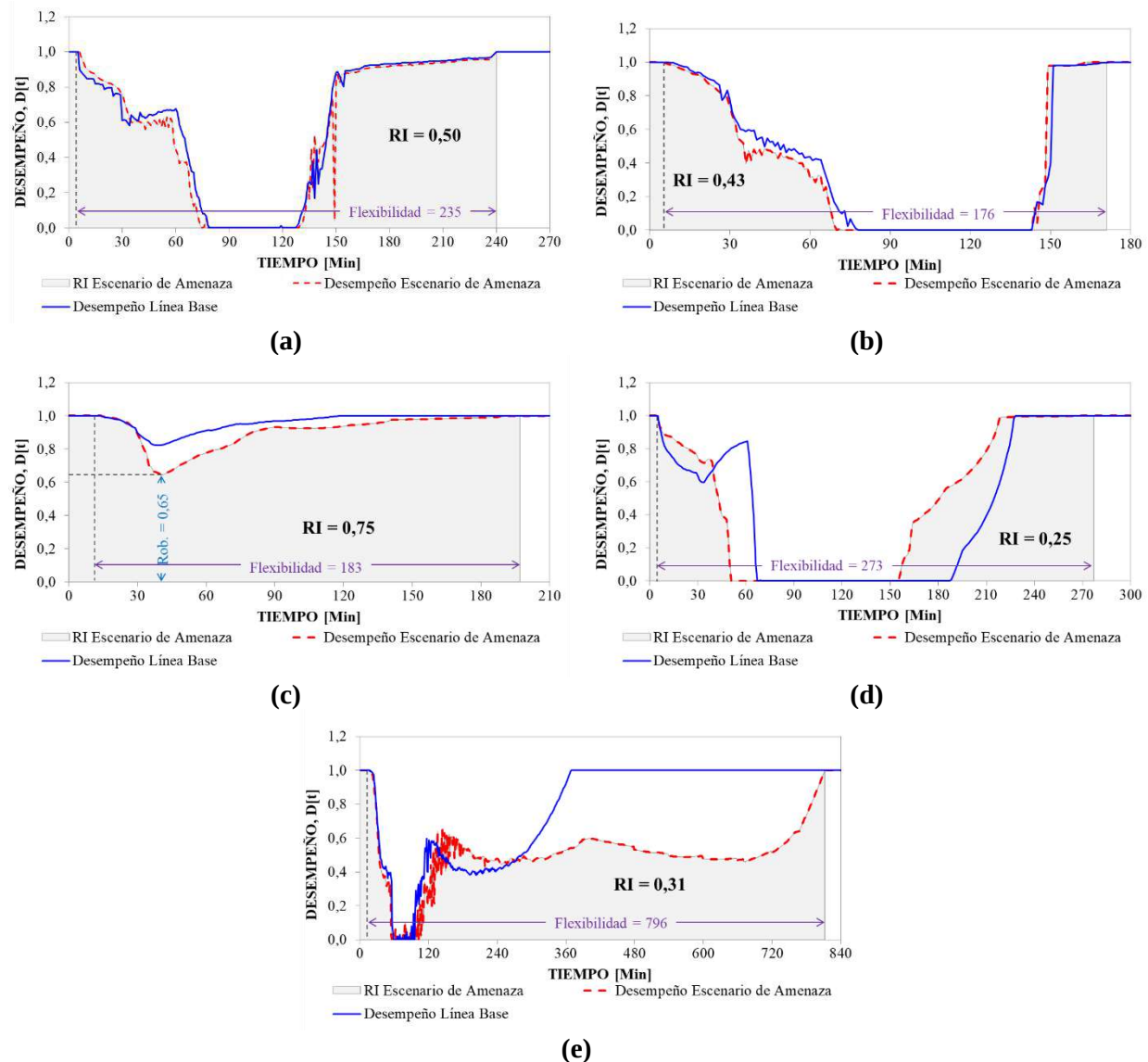


Figura 5.9 RI para el escenario de amenaza de reducción de la permeabilidad del suelo en: (a) SDS de Cali; y las subcuencas: (b) Cañaveralejo, (c) Lili, (d) Meléndez, y (e) Ferrocarril

Los resultados indican que reducir la permeabilidad del suelo en un 50% causó una disminución en la *flexibilidad* de las subcuencas Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Ferrocarril de 10, 78, 50 y 444 minutos

respectivamente, mientras que en el SDS no cambio. Por su parte, la *robustez* disminuyó en un 21% en la subcuenca Lili, mientras que en el SDS y las demás subcuencas continuaron con una *robustez* de 0 en comparación con la condición de línea base.

Los resultados también indican que con la amenaza de reducción de la permeabilidad el SDS y la subcuenca Lili presentan una RI moderada (entre 0,50 y 0,69), mientras que las subcuencas Cañaveralejo, Meléndez y Ferrocarril presentan una RI baja (entre 0,30 y 0,49), esto nuevamente obedece a que la subcuenca Lili tiene una red de alcantarillado pluvial con una mayor capacidad hidráulica en comparación con las demás subcuencas del SDS. Resultados similares de RI han sido obtenidos por Mugume *et al.* (2015b) para el SDU de la cuenca del río Nakivubo, Kampala, Uganda (RI entre 0,50 y 0,80), evaluando como escenario de amenaza los daños acumulados de varios elementos de la infraestructura; y Binesh *et al.* (2018) en el SDU del sector norte de Teherán, Irán (RI entre 0,69 y 0,94), evaluando como escenario de amenaza el incremento de la intensidad de lluvias.

Al analizar la RSE del SDS y sus subcuencas para el escenario de amenaza, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 RSE del SDS de Cali y sus subcuencas para el escenario de amenaza

Factores, variables y RSE	SDS	Subcuencas			
		Cañaveralejo	Lili	Meléndez	Ferrocarril
Social	0,36	0,33	0,41	0,35	0,36
Gobernanza	0,05	0,04	0,06	0,05	0,05
Riesgo de inundación	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12
Residuos sólidos en el SDU	0,09	0,08	0,10	0,08	0,09
Desarrollo económico de la población	0,10	0,10	0,12	0,10	0,10
Ecológico	0,08	0,06	0,07	0,10	0,02
Características físicas de la cuenca urbana	0,07	0,06	0,06	0,09	0,02
Regulación de inundaciones	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00
RSE	0,44	0,39	0,48	0,46	0,38
Calificación de la RSE	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja

Nota: Las variables críticas (menores a 0,10) se resaltaron en sombreado rojo claro con texto rojo oscuro

Los resultados indican que reducir la permeabilidad del suelo disminuyó el valor de las variables *características físicas de la cuenca urbana* y *regulación de inundaciones* en el SDS y todas sus subcuencas. Los resultados también muestran que la subcuenca Ferrocarril fue las que más disminuyó la RSE, pasando de 0,42 a 0,38 en comparación con la condición de línea base, ya que esta subcuenca, al tener la permeabilidad del suelo y el porcentaje de áreas verdes y cuerpos hídricos más bajos del SDS, causa que estos indicadores de RSE disminuyan en mayor proporción en comparación con las demás.

Por su parte, las subcuencas Cañaveralejo, Lili y Meléndez disminuyeron menos la RSE, pasando de 0,42 a 0,39, de 0,51 a 0,48 y de 0,48 a 0,46 respectivamente. Resultados similares de RSE han sido obtenidos por Rezende *et al.* (2019b) en el modelo conceptual evaluado en el SDU de la cuenca del Canal do Mangue, Río de Janeiro, Brasil (RSE menor 0,60), evaluando como escenario de amenaza el incremento de la intensidad de lluvias.

Por otra parte, al realizar el análisis de RI del SDS y sus subcuencas para las estrategias de mitigación ingenieriles de *recursividad* relacionada con la limpieza de canales y ríos y *redundancia* consistente en embalses en los puntos más críticos de cada subcuenca, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 5.10.

Los resultados indican que las estrategias ingenieriles aumentaron la *flexibilidad* en las subcuencas Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Ferrocarril en 12, 1, 1 y 4 minutos respectivamente mientras que en el SDS no mejoró. Por su parte, la *robustez* aumentó en un 16% en la subcuenca Lili en comparación con la condición de línea base, mientras que en el SDS y en las demás subcuencas no mejoró. Con la incorporación

de la estrategia ingenieril de limpieza de canales y ríos se obtuvo una *recursividad* en el SDS y en las subcuencas Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Ferrocarril de 0,04, 0,08, 0,12, 0,07 y 0,32 respectivamente, mientras que con la estrategia ingenieril de embalses en los puntos más críticos de cada subcuenca se obtuvo una *redundancia* en el SDS y las subcuencas Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Ferrocarril de 0,07, 0,19, 0,01, 0,18 y 0,02 respectivamente.

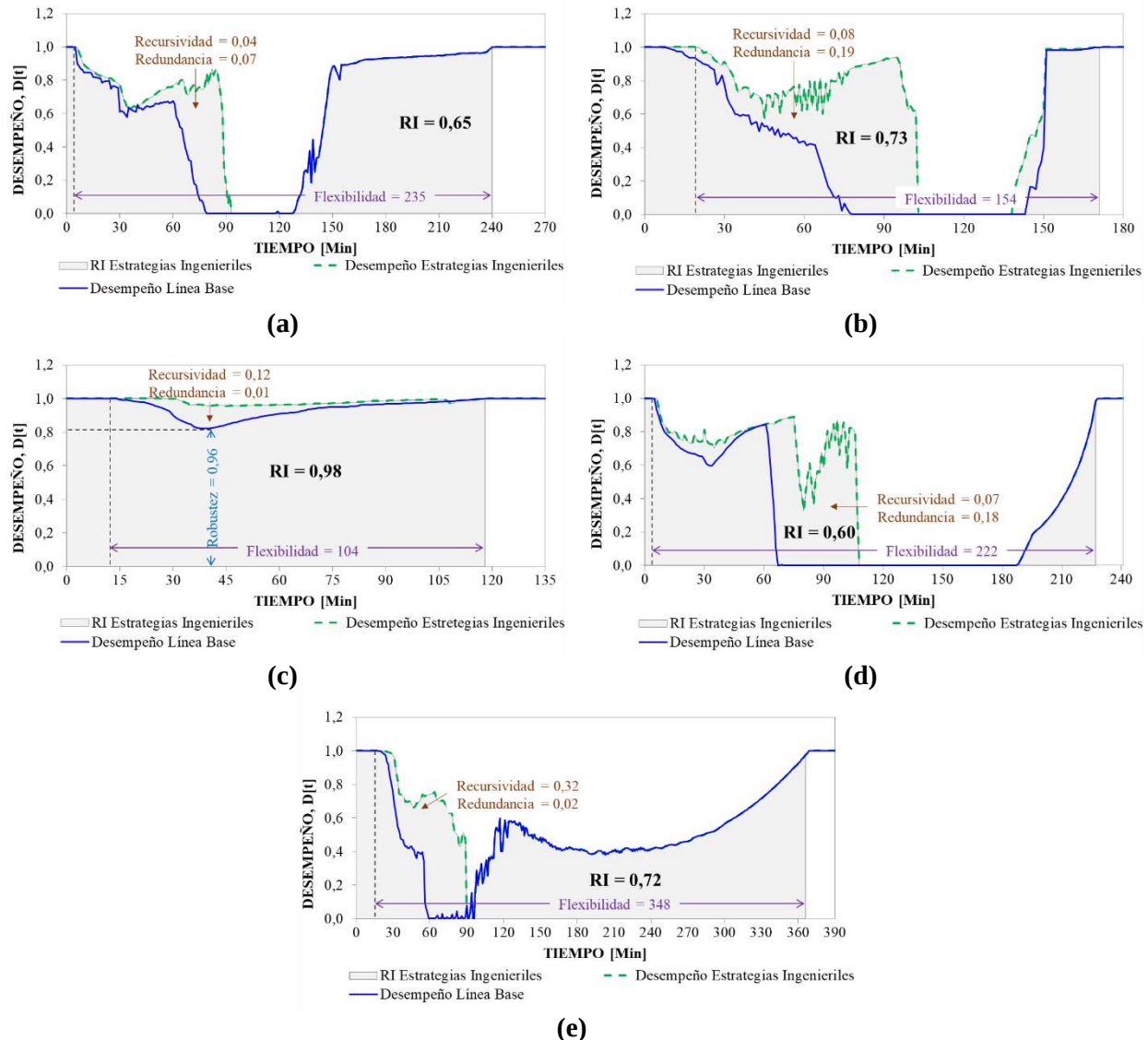


Figura 5.10 RI para las estrategias de mitigación ingenieriles en: (a) SDS de Cali; y las subcuencas: (b) Cañaveralejo, (c) Lili, (d) Meléndez, y (e) Ferrocarril

Los resultados también indican que las estrategias ingenieriles mejoraron la RI en 20%, 59%, 15%, 71%, 89% en el SDS y en las subcuencas Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Ferrocarril respectivamente en comparación con la condición de línea base, siendo la subcuenca Ferrocarril la que más aumentó su RI con las estrategias ingenieriles, esto obedece a que la infraestructura de ésta subcuenca es la que tiene mayor cantidad de residuos sólidos en comparación con las demás (EMCALI, 2016), la cual al limpiarse aumenta en mayor porcentaje su capacidad hidráulica. Por el contrario, la subcuenca Lili fue la que menos aumento su RI con las estrategias ingenieriles debido a la menor cantidad de residuos sólidos que presenta ésta subcuenca en comparación con las demás (EMCALI, 2016).

Posteriormente, al analizar la RSE del SDS y sus subcuencas para la estrategia de mitigación socio-ecológica de reglamentación en los usos del suelo, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 RSE del SDS de Cali y sus subcuencas para la estrategia de mitigación socio-ecológica

Factores, variables y RSE	SDS	Subcuencas			
		Cañaverealejo	Lili	Meléndez	Ferrocarril
Social	0,36	0,33	0,41	0,35	0,36
Gobernanza	0,05	0,04	0,06	0,05	0,05
Riesgo de inundación	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12
Residuos sólidos en el SDU	0,09	0,08	0,10	0,08	0,09
Desarrollo económico de la población	0,10	0,10	0,12	0,10	0,10
Ecológico	0,13	0,12	0,12	0,15	0,11
Características físicas de la cuenca urbana	0,11	0,11	0,11	0,12	0,10
Regulación de inundaciones	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01
RSE	0,49	0,45	0,54	0,50	0,46
Calificación de la RSE	Baja	Baja	Moderada	Moderada	Baja

Nota: Las variables críticas (menores a 0,10) se resaltaron en sombreado rojo claro con texto rojo oscuro

Los resultados indican que la estrategia socio-ecológica incrementó la RSE en el SDS y sus subcuencas en comparación con la condición de línea base. Los resultados también indican que la estrategia socio-ecológica aumentó el valor de las variables *características físicas de la cuenca urbana* y *regulación de las inundaciones* en el SDS y sus subcuencas, principalmente en la subcuenca Ferrocarril, en la cual la RSE pasó de 0,42 a 0,46, esto obedece a que ésta subcuenca al tener la permeabilidad del suelo y el porcentaje de áreas verdes y cuerpos hídricos más bajos del SDS, causa que estos indicadores de RSE aumenten en mayor proporción en comparación con las demás. La subcuenca Meléndez fue la que menos aumentó su RSE pasando de 0,48 a 0,50.

Finalmente, en la Figura 5.11 se presentan los resultados consolidados de resiliencia del SDS y sus subcuencas para el escenario de amenaza y las estrategias de mitigación ingenieriles y socio-ecológica.

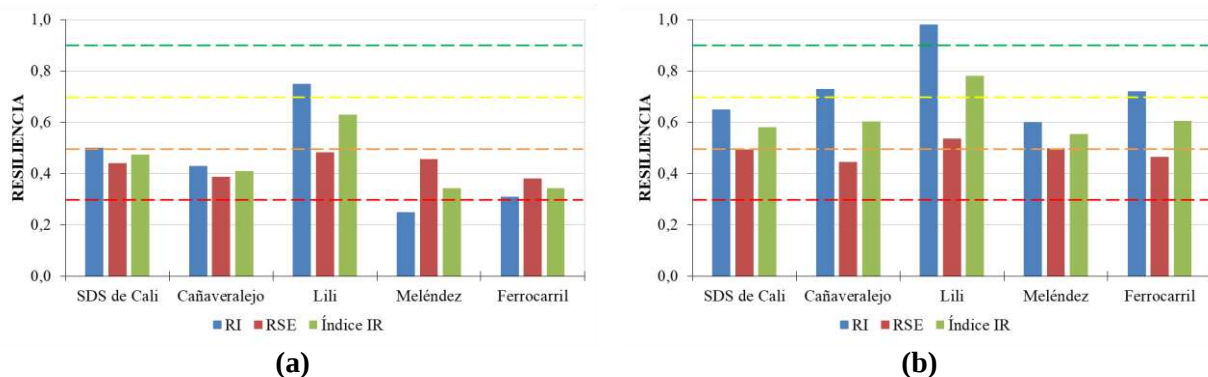


Figura 5.11 Resiliencia del SDS de Cali y sus subcuencas (a) Escenario de amenaza; y (b) Estrategias de mitigación ingenieriles y socio-ecológica. Umbrales de Resiliencia muy baja (— — —); Resiliencia baja (— — —); Resiliencia moderada (— — —); y Resiliencia alta (— — —)

Los resultados de la Figura 5.11a indican que reducir la permeabilidad del suelo disminuyó la RI en 7%, 12%, 29% y 18%, la RSE en 7%, 5%, 5% y 10% y el índice IR en 7%, 10%, 16% y 14% en las subcuencas Cañaverealejo, Lili, Meléndez y Ferrocarril respectivamente en comparación con la condición de línea base. Por su parte, reducir la permeabilidad del suelo disminuyó en el SDS la RI en 7%, la RSE en 6% y el índice IR en 7% en comparación con la condición de línea base. Los resultados también muestran que la subcuenca Meléndez es la que más disminuyó el índice IR (16%), mientras que en la subcuenca Cañaverealejo fue en la que menos disminuyó (7%).

Los resultados de la Figura 5.11b, indican que la combinación de las estrategias ingenieriles y socio-ecológica incrementaron la RI en 59%, 15%, 71% y 89%, la RSE en 7%, 5%, 4% y 10% y el índice IR en 37%, 12%, 36% y 52% en las subcuencas Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Ferrocarril respectivamente en comparación con la condición de línea base, lo cual generó un aumento en el SDS de la RI del 20%, la RSE del 6% y el índice IR del 14% en comparación con la condición de línea base. Se resalta que la subcuenca Ferrocarril fue la que más aumentó su índice IR (52%) cuando se combinaron las estrategias de mitigación, mientras que la subcuenca Lili fue la que menos aumentó (12%).

Se identificó que la RSE no varió significativamente con la estrategia socio-ecológica implementada debido a que el SDS tiene bajas áreas permeables, verdes y de cuerpos hídricos (CVC, 2019), esto indica que una estrategia necesariamente no aporta a la mitigación de todos los tipos de amenazas (Butler *et al.*, 2016; Bucherie *et al.*, 2022). Se resalta que la subcuenca Ferrocarril fue la que más aumentó su índice IR (52%) cuando se combinaron las estrategias de mitigación, mientras que la subcuenca Lili fue la que menos aumentó (12%).

En síntesis, la subcuenca más crítica y sobre la que debería prestarse más atención y/o formular más estrategias de mitigación es Ferrocarril, en esta subcuenca se obtuvieron valores bajos de resiliencia para la condición de línea base, cuando se evaluó el escenario de amenaza el índice IR disminuyó 14%, mientras que las estrategias de mitigación propuestas incrementaron este índice en 52% para esta subcuenca.

5.3.3 Evaluación de la sensibilidad del modelo conceptual a cambios en los indicadores

En la Figura 5.12 se presentan los estadísticos de resumen de las simulaciones de Monte Carlo. Los resultados indican que el índice IR varía entre 0,31 y 0,65, con un valor medio de 0,48, una desviación estándar de 0,047, una varianza de 0,0022 y una probabilidad del 90% que los resultados del índice IR estén en un rango entre 0,40 y 0,56.

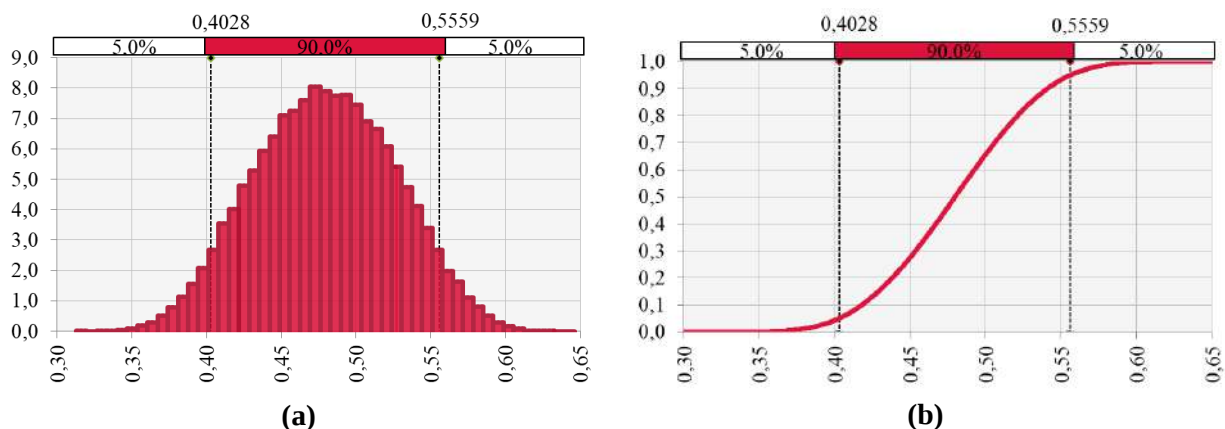
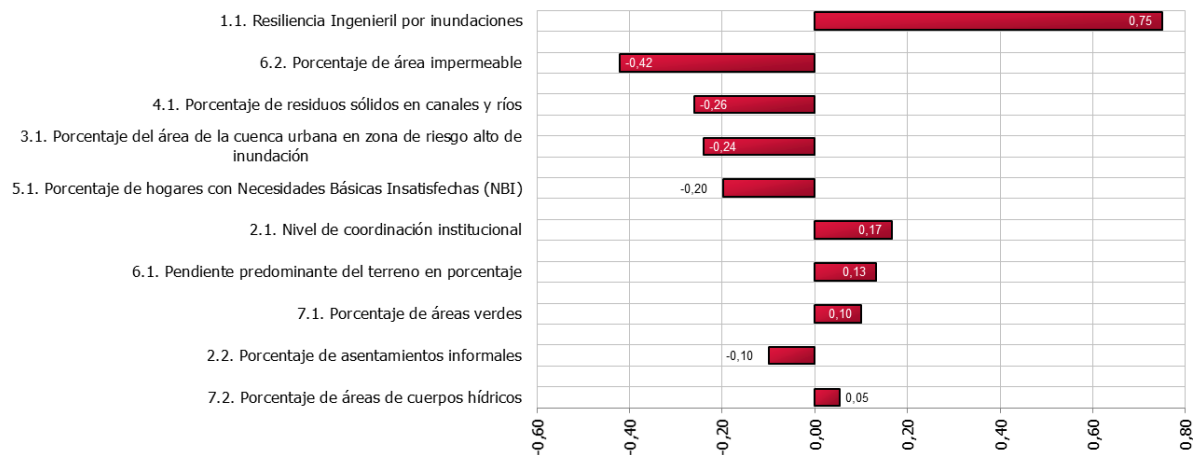
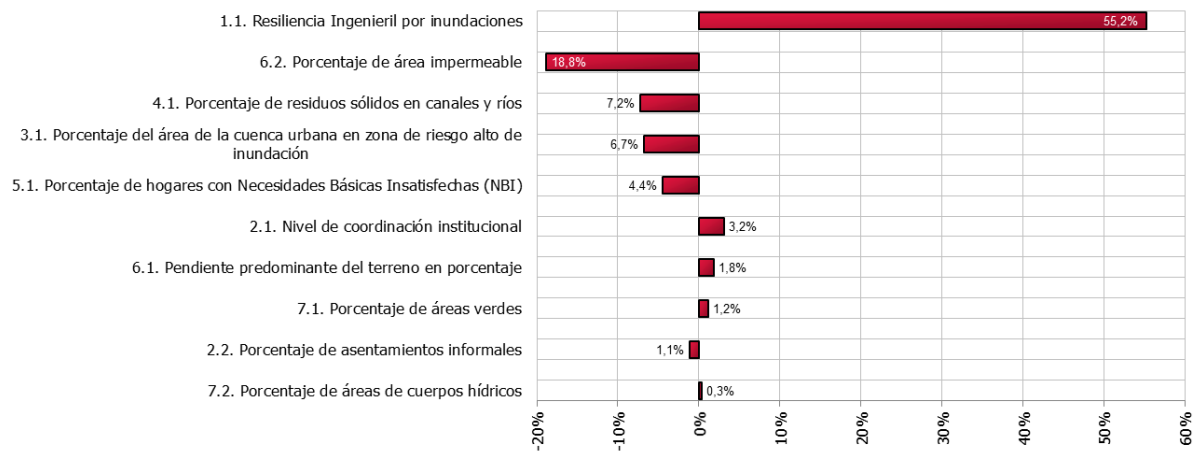


Figura 5.12 Estadísticos de resumen de las simulaciones de Monte Carlo (a) Densidad de probabilidad del índice IR; y (b) Probabilidad acumulada del índice IR

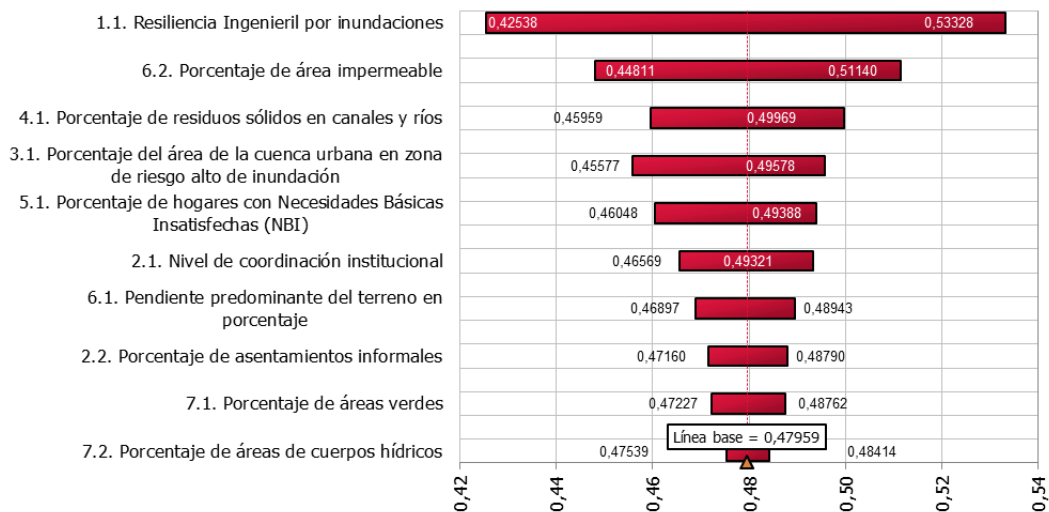
En la Figura 5.13 se presentan los resultados de la evaluación de la sensibilidad del modelo conceptual a cambios en los indicadores de resiliencia empleando simulaciones de Monte Carlo, mientras que en la Tabla 5.9 se presentan los indicadores jerarquizados del más sensible al menos sensible, el coeficiente de correlación de Spearman, la sensibilidad de los indicadores con respecto a la contribución a la varianza y la incertidumbre asociada a cada indicador con un intervalo de confianza del 90%.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.13 Análisis de sensibilidad del modelo conceptual a cambios en los indicadores (a) Coeficiente de correlación de Spearman; (b) Sensibilidad de los indicadores respecto a la contribución a la varianza; y (c) Incertidumbre de los indicadores con respecto a la media del índice IR

Tabla 5.9 Indicadores jerarquizados, coeficiente de correlación de Spearman, sensibilidad respecto a la contribución a la varianza e incertidumbre de los indicadores con un intervalo de confianza del 90%

Jerarquía	Indicadores	Coeficiente de correlación de Spearman	Sensibilidad respecto a la contribución a la varianza	Incertidumbre con respecto a la media del índice IR		
				Límite inferior	Límite superior	Rango
1	1.1. RI por inundaciones	0,7499	55,2%	0,42538	0,53328	±0,10791
2	6.2. Porcentaje de área impermeable	-0,4210	-18,8%	0,44811	0,51140	±0,06329
3	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	-0,2599	-7,2%	0,45959	0,49969	±0,04010
4	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	-0,2403	-6,7%	0,45577	0,49578	±0,04001
5	5.1. Porcentaje de hogares con NBI	-0,1984	-4,4%	0,46048	0,49388	±0,03340
6	2.1. Nivel de coordinación institucional	0,1660	3,2%	0,46569	0,49321	±0,02752
7	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	0,1327	1,8%	0,46897	0,48943	±0,02047
8	7.1. Porcentaje de áreas verdes	0,1008	1,2%	0,47227	0,48762	±0,01535
9	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	-0,0981	-1,1%	0,47160	0,48790	±0,01630
10	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	0,0533	0,4%	0,47539	0,48414	±0,00874

Los resultados indican que el modelo tiene sensibilidad alta a cambios en el indicador de *RI por inundaciones* (55%); media a cambios en los indicadores de RSE: *porcentaje de área impermeable* (19%), *porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos* (7%) y *porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación* (7%); y baja en los demás indicadores de RSE. Este resultado es consistente con algunos estudios que resaltan la importancia de los indicadores de RI para mejorar la resiliencia urbana (Huang *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2023).

A partir del análisis de sensibilidad de los indicadores con respecto a la contribución a la varianza, se estimó que el peso más adecuado de la RI y RSE para calcular el índice IR con el fin de evitar la doble contabilidad que puede darse por las correlaciones entre indicadores es de $W_I = 55,2\%$ y $W_{SE} = 44,8\%$.

Los resultados de incertidumbre indican que con una confianza del 90% el indicador *RI por inundaciones* presenta un rango de incertidumbre medio ($\pm 0,10791$), mientras que los demás indicadores presentan un rango de incertidumbre bajo (menor a $\pm 0,06329$). La mayor incertidumbre del indicador de *RI por Inundaciones* obedece a su alta sensibilidad en comparación con los demás indicadores.

En la Figura 5.14 se presentan diagramas de dispersión que muestran la correlación entre los valores del índice IR y los indicadores de RI y RSE. Los diagramas de dispersión están delimitados por cuadrantes en función del valor medio del índice IR (eje de abscisas) y el valor medio de cada indicador (eje de ordenadas) para mostrar el porcentaje de valores que se encuentran en cada cuadrante.

Los diagramas de dispersión indican que el índice IR tiene una correlación positiva fuerte con el indicador de *RI por inundaciones* y una correlación positiva débil con los indicadores de RSE: *nivel de coordinación institucional*, *pendiente predominante del terreno en porcentaje*, *porcentaje de áreas verdes* y *porcentaje de cuerpos hídricos*, indicadores con coeficiente de correlación de Spearman positivos. Por el contrario, el índice IR tiene una correlación negativa débil con los indicadores de RSE: *porcentaje de asentamientos informales*, *porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación*, *porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos*, *porcentaje de hogares con NBI* y *porcentaje de área impermeable*, indicadores con coeficiente de correlación de Spearman negativos. Los indicadores con correlación positiva generan un efecto positivo en la resiliencia mientras que los indicadores con correlación negativa generan un efecto negativo cuando su valor aumenta (Moghadas *et al.*, 2019).

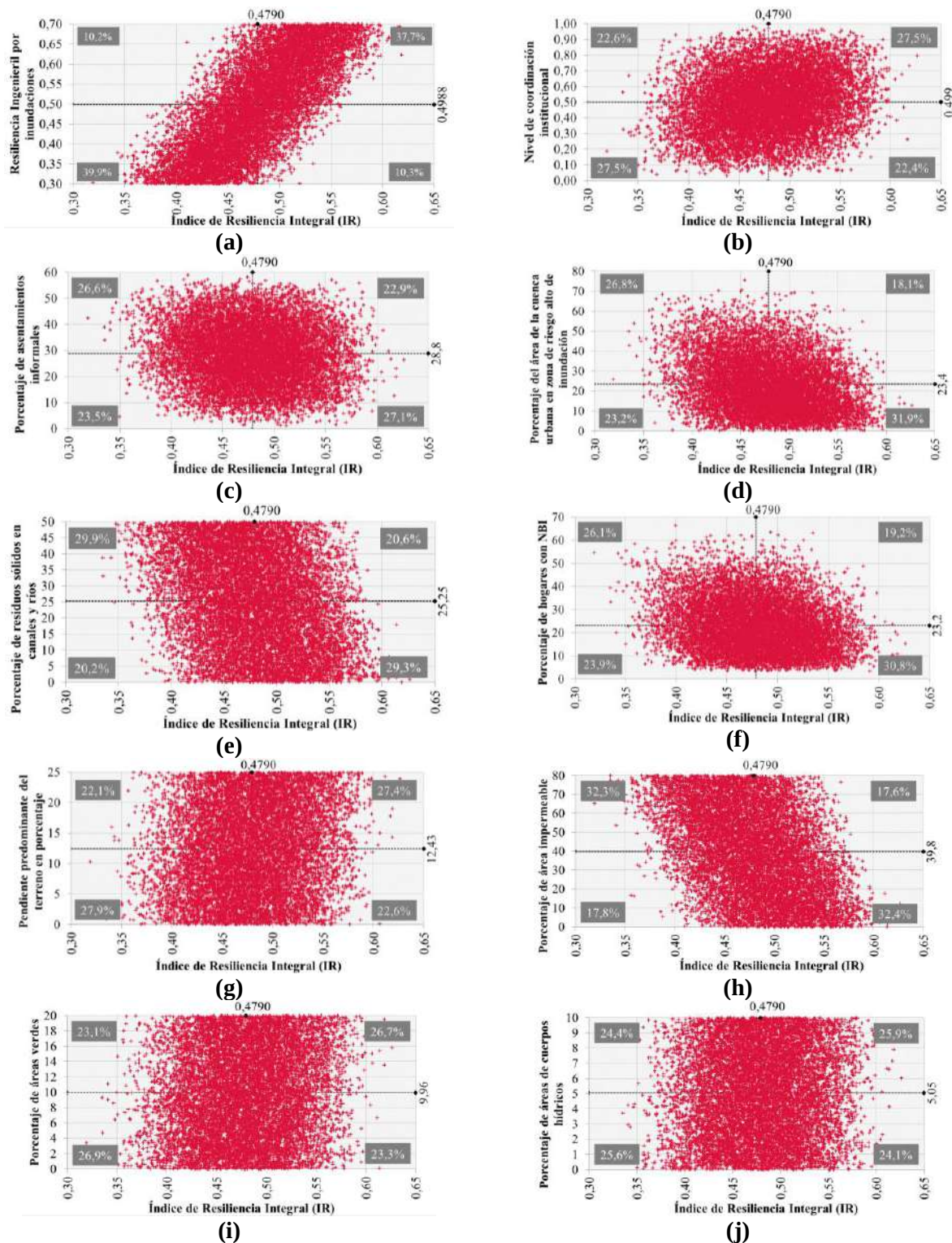


Figura 5.14 Diagramas de dispersión del índice IR en términos de los indicadores de RI: (a) RI por Inundaciones; RSE: (b) Nivel de coordinación institucional, (c) Porcentaje de asentamientos informales, (d) Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación, (e) Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos, (f) Porcentaje de hogares con NBI, (g) Pendiente predominante del terreno en porcentaje, (h) Porcentaje de área impermeable, (i) Porcentaje de áreas verdes, y (j) Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos

5.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5

Analizar de forma separada la RI y RSE generó resultados diferentes según el enfoque de resiliencia adoptado. En consecuencia se puede considerar que analizar conjuntamente estos dos enfoques permite obtener un valor más integral de resiliencia, permitiendo identificar las estrategias más adecuadas que se requieren incorporar en el SDU para mitigar las amenazas y así mismo brindar más información para la toma de decisiones.

El SDS, conformado por las subcuencas Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Ferrocarril en su condición de línea base tiene una RI y un índice IR moderados y RSE baja (RI de 0,54, RSE de 0,47 e índice IR de 0,51), siendo la subcuenca Ferrocarril la menos resiliente (RI, RSE e índice IR bajos) y la subcuenca Lili la más resiliente (RI alta y RSE e índice IR moderados). Al evaluar el efecto de un escenario de amenaza hipotético en la resiliencia del SDS, consistente en la reducción de la permeabilidad del suelo en un 50%, la RI, RSE y el índice IR de este SDU disminuyó en 7%, 6% y 7% respectivamente. Por su parte, incorporar en el SDS estrategias de mitigación ingenieriles de *recursividad* relacionada con la limpieza de canales y ríos y *redundancia* consistente en embalses en los puntos más críticos de cada subcuenca y una estrategia de mitigación socio-ecológica de reglamentación en los usos del suelo, aumentó la RI, RSE y el índice IR de este SDU en 20%, 6% y 14% respectivamente.

El modelo conceptual propuesto permitió obtener resultados de RI, RSE e IR representativos del SDS en comparación con resultados obtenidos en modelos conceptuales de análisis de resiliencia evaluados en SDU de ciudades de países en desarrollo similares al SDS, por lo cual se puede establecer que el modelo conceptual es apropiado para realizar el análisis de RI, RSE e IR de un SDU en su condición de línea base, frente a escenarios de amenaza y con estrategias de mitigación propuestas.

La evaluación de la sensibilidad permitió jerarquizar los indicadores del más sensible al menos sensible, estimar el grado de correlación entre indicadores, estimar el peso de la RI y RSE en el índice IR e identificar el rango de incertidumbre de los indicadores.

El modelo conceptual tiene sensibilidad alta a cambios en el indicador de *RI por inundaciones*; sensibilidad media a los indicadores de RSE: *porcentaje de área impermeable*, *porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos* y *porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación*; y sensibilidad baja en los demás indicadores de RSE. Adicionalmente, el índice IR tiene una correlación positiva con el indicador *RI por inundaciones* y los indicadores de RSE: *nivel de coordinación institucional*, *pendiente predominante del terreno en porcentaje*, *porcentaje de áreas verdes* y *porcentaje de cuerpos hídricos*; y una correlación negativa con los indicadores de RSE: *porcentaje de asentamientos informales*, *porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación*, *porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos*, *porcentaje de hogares con NBI* y *porcentaje de área impermeable*. Los indicadores con correlación positiva generan un efecto positivo en la resiliencia mientras que los indicadores con correlación negativa generan un efecto negativo cuando su valor aumenta.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES FINALES

De acuerdo con los objetivos inicialmente propuestos y conforme con los resultados obtenidos, las principales conclusiones derivadas de la presente investigación doctoral son:

- i) Se identificaron cuatro factores clave de Resiliencia Ingenieril (RI): *flexibilidad, recursividad, redundancia y robustez* y dos de Resiliencia Socio-Ecológica (RSE): *social y ecológico*, los cuales deben ser considerados conjuntamente para un análisis de Resiliencia Integral (IR). Los factores de RI evalúan la capacidad de cambio, de movilizar recursos, la presencia de opciones y la capacidad de resistir respectivamente, mientras que los factores de RSE consideran la forma como el Sistema Socio-Ecológico (SSE) está expuesto a las fallas y la incidencia que tiene el subsistema social (instituciones y usuarios) en la cuenca urbana alterando sus dinámicas lo cual modifica su RSE. En la RI se identificó como variable clave el *desempeño del SDU*. Por su parte, en la RSE se identificaron las siguientes variables sociales claves: *gobernanza, riesgo de inundación, residuos sólidos en el SDU y desarrollo económico de la población*, y las siguientes variables ecológicas claves: *características físicas de la cuenca urbana y regulación de inundaciones*. Para cuantificar estas variables, se proponen sus correspondientes indicadores.
- ii) El modelo conceptual integra la RI y la RSE mediante el índice IR y se compone de cuatro bloques temáticos en una estructura cíclica: 1). Definición del SDU; 2). Escenarios de Amenaza; 3). Análisis de Resiliencia; y 4). Formulación de Estrategias. En el primer bloque se definen las características del SDU, lo cual permite establecer la condición inicial del SDU. En el segundo bloque se identifican las amenazas que puede afrontar el SDU y se formulan los escenarios de amenaza priorizados. En el tercer bloque se emplean los factores, variables e indicadores de resiliencia para establecer el nivel de resiliencia del SDU. Finalmente, en el cuarto bloque se establecen las estrategias de mitigación que se pueden incorporar en el SDU, de tal forma que pueda mejorar la resiliencia; una vez incorporadas las estrategias, comienza un nuevo ciclo de análisis.
- iii) El modelo conceptual es apropiado para analizar la resiliencia de SDU, porque su proceso de evaluación en el Sistema de Drenaje Sur (SDS) de Cali, incluyó la evaluación de: 1). La estructura general del modelo y sus relaciones; 2). La concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del SDS; y 3). La sensibilidad del modelo a cambios en los indicadores. Para el SDS se obtuvieron valores de RI e índice IR moderados y RSE baja (RI de 0,54, RSE de 0,47 e índice IR de 0,51) en su condición de línea base; cuando se evaluó el escenario de amenaza de reducción de la permeabilidad del suelo en un 50%, los valores de RI, RSE y el índice IR disminuyeron en 7%, 6% y 7% respectivamente. Por su parte, incorporar estrategias de mitigación ingenieriles de *recursividad y redundancia*, consistentes en la limpieza de canales y ríos y embalses en los puntos más críticos de cada subcuenca respectivamente y una estrategia de mitigación socio-ecológica, a través de la reglamentación en los usos del suelo, permitió aumentar la RI, RSE y el índice IR en 20%, 6% y 14% respectivamente.

- iv) Se encontró que el modelo conceptual tiene sensibilidad alta a cambios en el indicador de *RI por inundaciones*, media a cambios en los indicadores de RSE: *porcentaje de área impermeable, porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos y porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación*; y baja en los demás indicadores de RSE. El índice IR tiene una correlación positiva con el indicador de *RI por inundaciones* y los indicadores de RSE: *nivel de coordinación institucional, pendiente predominante del terreno en porcentaje, porcentaje de áreas verdes y porcentaje de cuerpos hídricos*; por el contrario el índice IR tiene una correlación negativa con los indicadores de RSE: *porcentaje de asentamientos informales, porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación, porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos, porcentaje de hogares con NBI y porcentaje de área impermeable*. Los indicadores con correlación positiva generan un efecto positivo en la resiliencia mientras que los indicadores con correlación negativa generan un efecto negativo cuando su valor aumenta.
- v) El modelo conceptual desarrollado es una herramienta metodológica de planeación que facilita el análisis de la resiliencia de SDU. Aporta elementos para la gestión sostenible de SDU que han sido planteados a partir de la revisión de literatura y de la consulta a expertos nacionales e internacionales en drenaje urbano y resiliencia, y profesionales de instituciones del sector agua y saneamiento. Las características que se destacan del modelo son: 1). Permite analizar de manera integrada la RI y RSE de un SDU por cantidad de agua (inundaciones) en su condición inicial y frente a escenarios de amenaza; 2). Tiene un énfasis en aspectos ingenieriles del desempeño del SDU y socio-ecológicos institucionales, de los usuarios, de la cuenca y el servicio ecosistémico de regulación de inundaciones; y 3). Considera la posibilidad de incorporar estrategias de mitigación ingenieriles y/o socio-ecológicas para mejorar la resiliencia.
- vi) El modelo conceptual desarrollado constituye un aporte para el análisis de la resiliencia de SDU, ya que incluye aspectos tanto ingenieriles como socio-ecológicos, sirviendo como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de SDU. Este enfoque hace que el modelo desarrollado sea particularmente útil para ayudar a lograr que los SDU sean sostenibles y resilientes a las amenazas.

6.2 RECOMENDACIONES

Con relación a estudios futuros que permitan avanzar en el desarrollo de modelos conceptuales para el análisis de la resiliencia de SDU, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- i) Dar continuidad al desarrollo del modelo conceptual incluyendo otros factores, variables e indicadores. En este sentido, se recomienda incluir un factor económico, que evalúe aspectos asociados a costos tales como los costos de inversión inicial, costos de operación y mantenimiento del SDU, costos de los daños y pérdidas por inundaciones y costos asociados a las inversiones para mejorar la resiliencia y/o la infraestructura; también se recomienda incluir el componente de calidad asociado a la contaminación de cuerpos hídricos receptores. Estos componentes adicionales podrían fortalecer el modelo conceptual propuesto en temas poco abordados en la literatura.

- ii) Evaluar la sensibilidad de los pesos de los indicadores socio-ecológicos para tener un panorama más amplio del comportamiento del modelo conceptual en SDU de contextos diferentes al de países en desarrollo.
- iii) Evaluar el modelo conceptual en otros SDU a nivel nacional y regional así como considerar otros escenarios de amenaza y estrategias de mitigación ingenieriles y socio-ecológicas, para realizar ajustes en sus componentes que aporten a una mayor confiabilidad.
- iv) Desarrollar un software del modelo conceptual con el fin de optimizar el manejo de información y facilitar su aplicación a futuros casos de estudio. El software que se desarrolle debe articularse con un programa de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el modelo de gestión de aguas lluvias – *Storm Water Management Model* (SWMM). Este software también debe ser evaluado.
- v) Emplear el modelo conceptual también como una herramienta pedagógica en las instituciones que gestionan los SDU, mostrando resultados a las comunidades locales de la aplicación del modelo con escenarios de amenaza y estrategias de mitigación, de tal forma que se puedan realizar discusiones, atraer el interés público y fomentar el desarrollo de comunidades resilientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEDEJI, T. J.; PROVERBS, D. G.; XIAO, H. & OLADOKUN, V. O. (2018). Towards a conceptual framework for property level flood resilience. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 8, 493-504.
- AGRAWAL, A. (2006). Using RefViz© with EndNote. 211-224.
- AHERN, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100, 341-343.
- AHERN, J.; CILLIERS, S. & NIEMELÄ, J. (2014). The concept of ecosystem services in adaptive urban planning and design: A framework for supporting innovation. *Landscape and Urban Planning*, 125, 254-259.
- ALVIS, J. F.; MARTÍNEZ-CANO, C. & GALVIS, A. (2016). A simple regionalization approach as an alternative to obtain rainfall data in a tropical and ungauged catchment. *Ingeniería y Competitividad*, 18, 34.
- ANG, A. H.-S. & TANG, W. H. (2007). *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*, New York, Wiley.
- ARNER, E. (2013). Resiliencia urbana: La adaptación a corto plazo para la recuperación a largo plazo después de las inundaciones en Canadá. *Ciencia en su PC*, 52-65.
- ASAH, S. T. (2008). Empirical social-ecological system analysis: from theoretical framework to latent variable structural equation model. *Environ Manage*, 42, 1077-90.
- AYYUB, B. M. (2014). Systems Resilience for Multihazard Environments: Definition, Metrics, and Valuation for Decision Making. *Risk Analysis*, 34, 340-355.
- BALAEI, B.; WILKINSON, S.; POTANGAROA, R.; HASSANI, N. & ALAVI-SHOSHTARI, M. (2018). Developing a Framework for Measuring Water Supply Resilience. *Natural Hazards Review*, 19, 04018013.
- BALICA, S. & WRIGHT, N. G. (2010). Reducing the complexity of the flood vulnerability index. *Environmental Hazards*, 9, 321-339.
- BALSELLS, M.; BARROCA, B.; AMDAL, J. R.; DIAB, Y.; BECUE, V. & SERRE, D. (2013). Analysing urban resilience through alternative stormwater management options: application of the conceptual Spatial Decision Support System model at the neighbourhood scale. *Water Sci Technol*, 68, 2448-57.
- BANCO MUNDIAL (2012). *Gestión Integral de Aguas Urbanas*, Washington D.C., Banco Mundial.
- BARAHONA, J. (2018). *Calibración de modelos de simulación determinísticos en sistemas de drenaje urbano*. Trabajo de grado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. 68 p.
- BARREIRO, J.; LOPES, R.; FERREIRA, F.; BRITO, R.; TELHADO, M. J.; MATOS, J. S. & MATOS, R. S. (2020). Assessing Urban Resilience in Complex and Dynamic Systems: The RESCCUE Project Approach in Lisbon Research Site. *Sustainability*, 12, 8931.
- BECCARI, B. (2016). A Comparative Analysis of Disaster Risk, Vulnerability and Resilience Composite Indicators. *PLoS Curr*, 8.
- BERKES, F.; COLDING, J. & FOLKE, C. (2002). *Navigating Social-Ecological Systems*.
- BERKES, F. & FOLKE, C. (2000). *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*, Cambridge, Cambridge University Press.

- BERTILSSON, L.; WIKLUND, K.; DE MOURA TEBALDI, I.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. & MIGUEZ, M. G. (2019). Urban flood resilience – A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. *Journal of Hydrology*, 573, 970-982.
- BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L.; CHEBBO, G. & SAGET, A. (1998). Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Research*, 32, 2341-2356.
- BINESH, N.; NIKSOKHAN, M. H.; SARANG, A. & RAUCH, W. (2018). Improving resilience of urban drainage system in adaptation to climate change (Case study: Northern Tehran, Iran). *CSCE 2018 Annual Conference: Building Tomorrow's Society*. Fredericton, Canada.
- BLACKMORE, J. M. & PLANT, R. A. J. (2008). Risk and resilience to enhance sustainability with application to urban water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 134, 224-233.
- BLOCKLEY, D.; AGARWAL, J. & GODFREY, P. (2012). Infrastructure resilience for high-impact low-chance risks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 165, 13-19.
- BOLINAGA, J. (1979). *Drenaje urbano*, Caracas, Venezuela, Instituto Nacional de Obras Sanitarias.
- BOSHER, L.; AMARATUNGA, D.; DAINITY, A.; CARRILLO, P.; GLASS, J. & PRICE, A. (2009). Attaining improved resilience to floods: a proactive multi-stakeholder approach. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 18, 9-22.
- BRUNEAU, M.; CHANG, S. E.; EGUCHI, R. T.; LEE, G. C.; O'ROURKE, T. D.; REINHORN, A. M.; SHINOZUKA, M.; TIERNEY, K.; WALLACE, W. A. & VON WINTERFELDT, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, 19, 733-752.
- BRUNEAU, M. & REINHORN, A. (2007). Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities. *Earthquake Spectra*, 23, 41-62.
- BUCHERIE, A.; HULTQUIST, C.; ADAMO, S.; NEELY, C.; AYALA, F.; BAZO, J. & KRUCZKIEWICZ, A. (2022). A comparison of social vulnerability indices specific to flooding in Ecuador: principal component analysis (PCA) and expert knowledge. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 73, 102897.
- BUTLER, D. & DAVIES, J. W. (2011). *Urban Drainage*, London, Spon Press.
- BUTLER, D.; FARMANI, R.; FU, G.; WARD, S.; DIAO, K. & ASTARAIE-IMANI, M. (2014). A new approach to urban water management: Safe and Sure. *Procedia Engineering*, 89, 347-354.
- BUTLER, D.; WARD, S.; SWEETAPPLE, C.; ASTARAIE-IMANI, M.; DIAO, K.; FARMANI, R. & FU, G. (2016). Reliable, resilient and sustainable water management: the Safe & SuRe approach. *Global Challenges*.
- CANHOLI, A. P. (2005). *Drenagem urbana e controle de enchentes*, São Paulo, Brazil, Oficina de Textos.
- CARPENTER, S.; WALKER, B.; ANDERIES, J. M. & ABEL, N. (2014). From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems*, 4, 765-781.
- CASTRILLÓN, Y. (2014). *Estrategias para el control de inundaciones en la zona urbana de la cuenca del río Meléndez*. Trabajo de grado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. 74 p.
- CEPAL (2001). El método de las necesidades básicas insatisfechas (NBI) y sus aplicaciones en América Latina. Santiago de Chile: CEPAL.
- CGSC (2019). Informe auditoría gubernamental con enfoque integral modalidad regular al municipio de Santiago de Cali (Incluye Concejo Municipal) vigencia 2019. Cali: Contraloría General de Santiago de Cali.

- CIMELLARO, G. P.; REINHORN, A. M. & BRUNEAU, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 32, 3639-3649.
- CONCHA, R. (2007). Introducción a EPA SWMM 5.0. *Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- CONSTANTINO, R., M. & DÁVILA, I. H. (2011). Una aproximación a la vulnerabilidad y la resiliencia ante eventos hidrometeorológicos extremos en México. *Política y Cultura*, Otoño 2011, 15-44.
- CULLIVAN, D.; TIPPETT, B.; EDWARDS, D. B.; ROSENSWEIG, F. & MCCAFFERY, J. (1988). *Guidelines for Institutional Assessment Water and Wastewater Institutions*, Washington DC, USA, US Agency for International Development.
- CUMMING, G. S. (2011). *Spatial Resilience in Social-Ecological System*, Cape Town, Springer.
- CUTTER, S. L.; BARNES, L.; BERRY, M.; BURTON, C.; EVANS, E.; TATE, E. & WEBB, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 18, 598-606.
- CUTTER, S. L.; BURTON, C. G. & EMRICH, C. T. (2010). Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 7.
- CVC (2019). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica de los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo. Cali: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
- CVC (2021). Boletín hidrológico. Cali, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
- CHANG, S. E.; MCDANIELS, T.; FOX, J.; DHARIWAL, R. & LONGSTAFF, H. (2014). Toward Disaster-Resilient Cities: Characterizing Resilience of Infrastructure Systems with Expert Judgments. *Risk Analysis*, 34, 416-434.
- CHANG, S. E. & SHINOZUKA, M. (2004). Measuring Improvements in the Disaster Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, 20, 739-755.
- CHEN, Y. R.; YEH, C. H. & YU, B. F. (2011). Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan. *Natural Hazards*, 59, 1261-1276.
- DA SILVA, J.; KERNAGHAN, S. & LUQUE, A. (2012). A systems approach to meeting the challenges of urban climate change. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 4, 125-145.
- DAGMA (1997). Diseño de las obras de protección de los ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo. Cali, Colombia: Departameto Administrativo de Gestión del Medio Ambiente.
- DAGMA (2000). Estudio de zonas de alto riesgo y diseño de obras de protección del río Cañaveralejo. Cali, Colombia: Departamento Administrativo de Gestión de Medio Ambiente.
- DAGMA (2009). Caracterización biofísica, social y de infraestructura para la formulación del POMCH de la cuenca de los ríos Meléndez, Lili y Cañaveralejo. Cali: Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente.
- DAGMA (2021). Boletín hidrológico. Cali, Colombia: Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente de Cali.
- DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018* [Online]. Bogotá, Colombia: Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Available: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018> [Accessed Diciembre 14 2021].

- DAPM (2014). Plan de Ordenamiento Territorial de Santiago de Cali. Cali: Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Santiago de Cali.
- DAVIES, M. L. (2011). *Water and wastewater engineering: Design principles and practice*, New York, USA, McGraw-Hill.
- DE BRUIJN, K. M. (2004). Resilience and flood risk management. *Water Policy*, 6, 53-66.
- DELGADO, A.; PULIDO, S. & GALVIS, A. (2007). Modelación hidrodinámica del sistema de drenaje urbano de la ciudad de Cali en el área de influencia del río Cali. *Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- DHAR, T. K. & KHIRFAN, L. (2017). A multi-scale and multi-dimensional framework for enhancing the resilience of urban form to climate change. *Urban Climate*, 19, 72-91.
- DÍAZ-GRANADOS, M.; RODRÍGUEZ, J. P.; RODRIGUEZ, M. S.; PENAGOS, J. C.; CAMACHO, L. A.; ACHLEITNER, S.; MAKSIMOVIC, C. & MCINTYRE, N. (2010). Towards a paradigm shift in urban drainage management and modelling in developing countries. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes*, 30, 133-150.
- DJORDJEVIĆ, S.; BUTLER, D.; GOURBESVILLE, P.; MARK, O. & PASCHE, E. (2011). New policies to deal with climate change and other drivers impacting on resilience to flooding in urban areas: the CORFU approach. *Environmental Science & Policy*, 14, 864-873.
- DOMÍNGUEZ, E. A. (2018). *Evaluación de la redundancia en la gestión de la resiliencia en Sistemas de Drenaje Urbano*. Trabajo de Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. 87 p.
- DONG, X.; GUO, H. & ZENG, S. (2017). Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. *Water Res*, 124, 280-289.
- EL_ESPECTADOR. 2021. Fuertes lluvias provocan emergencias en Cali. *Periodico El Espectador*, 22 de marzo de 2021.
- EL_PAÍS. 2021. Cali se inundó: Impactantes imágenes de la emergencia invernal 2021. *Periódico El País*, 22 de marzo de 2021.
- EL_TIEMPO. 2021. Crecientes de aguabarro y derrumbes asustaron durante amanecer a Cali. *Periódico El Tiempo*, 23 de marzo de 2021.
- EMCALI (2016). Ajuste plan de saneamiento y manejo de vertimientos PSMV 2016-2030. Cali: Empresas Municipales de Cali.
- ESCALANTE, R. & BASURTO, S. (2014). Resiliencia de un Sistema Socio-Ecológico. *Cambio climático y sistemas socioecológicos*, 25-36.
- ETTRICH, N.; THOMAS, M. & SCHMITT, T. G. (2005). Assessment of urban flooding by dual drainage simulation model RisUrSim. *Water Science and Technology*, 52, 257-264.
- FENNER, R.; O'DONNELL, E.; AHILAN, S.; DAWSON, D.; KAPETAS, L.; KRIVTSOV, V.; NCUBE, S. & VERCRUYSE, K. (2019). Achieving Urban Flood Resilience in an Uncertain Future. *Water*, 11, 1082.
- FISRWG. (2000). *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices* [Online]. Federal Interagency Stream Restoration Working Group. Available: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MEDIA/nrcs143_024824.jpg [Accessed Junio 20 2021].
- FLYNN, C. D. & DAVIDSON, C. I. (2016). Adapting the social-ecological system framework for urban stormwater management: the case of green infrastructure adoption. *Ecology and Society*, 21.

- FOLKE, C. (2006a). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16, 253-267.
- FOLKE, C. (2006b). Social–ecological systems and adaptive governance of the commons. *Ecological Research*, 22, 14-15.
- FOLKE, C.; CARPENTER, D. O.; ELMQVIST, T.; GUNDERSON, L.; HOLLING, C.; WALKER, B.; BENGTTSSON, L. & BERKES, F. (2002). *Resilience and sustainable development: Building adaptative capacity in a world of transformation*.
- FRYD, O.; DAM, T. & JENSEN, M. B. (2012). A planning framework for sustainable urban drainage systems. *Water Policy*, 14, 865.
- GARCÍA, P.; BUTLER, D.; COMAS, J.; DARCH, G.; SWEETAPPLE, C.; THORNTON, A. & COROMINAS, L. (2017). Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management. State of the art. *Water Research*, 115, 149-161.
- GAY, L. F. & SINHA, S. K. (2013). Resilience of civil infrastructure systems: literature review for improved asset management. *International Journal of Critical Infrastructures*, 9, 330.
- GEOFFREY, F. R. & VICKRIDGE, I. G. (1997). *Sewers - Rehabilitation and New Construction: Repair and Renovation*, Elsevier Butterworth-Heinemann.
- GERTSEVA, V. V. & GERTSEV, V. I. (2006). A conceptual model of fish functional relationships in marine ecosystems and its application for fisheries stock assessment. *Fisheries Research*, 81, 9-14.
- GHARAIBEH, N. G.; CHIU, Y.-C. & GURIAN, P. L. (2006). Decision Methodology for Allocating Funds across Transportation Infrastructure Assets. *Journal of Infrastructure Systems*, 12, 1-9.
- GLASSMAN, N. R. (2005). RefViz 1.0.1. *Journal of the Medical Library Association*, 93, 293-294.
- GOMES, M.; PIRES, A. & FERREIRA, P. (2012). Sustainable drainage systems: An integrated approach, combining hydraulic engineering desing, urban land control and river revitalization aspects. *Drainage systems*. Rijeka, Croatia: InTech Europe.
- GÓMEZ, E.; NAVAS, D. F.; APONTE, G. & BATANCOURT, L. A. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *DYNA*, 81, 158-163.
- GRABOWSKI, Z. J.; MATSLER, A. M.; THIEL, C.; MCPHILLIPS, L.; HUM, R.; BRADSHAW, A.; MILLER, T. & REDMAN, C. (2017). Infrastructures as Socio-Eco-Technical Systems: Five Considerations for Interdisciplinary Dialogue. *Journal of Infrastructure Systems*, 23, 02517002.
- GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K. & MARTINEZ, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91.
- GWP (2012). *Integrated Urban Water Management, TEC Background Papers*, Stockholm, Sweden.
- HALL, M. J. (1984). *Urban Hydrology*, Elsevier Applied Science Ltd.
- HAMMOND, M.; CHEN, A. S.; BATICA, J.; BUTLER, D.; DJORDJEVIĆ, S.; GOURBESVILLE, P.; MANOJLOVIĆ, N.; MARK, O. & VEERBEEK, W. (2018). A new flood risk assessment framework for evaluating the effectiveness of policies to improve urban flood resilience. *Urban Water Journal*, 15, 427-436.
- HAUGER, M. B.; MOUCHEL, J. M. & MIKKELSEN, P. S. (2006). Indicators of hazard, vulnerability and risk in urban drainage. *Water Science and Technology*.

- HERNÁNDEZ, L. C. (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*. MSc., Universidad Nacional de Colombia. p.
- HOLLING, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 4, 1-23.
- HOLLING, C. S. (1996). Engineering resilience versus ecological resilience. *Engineering within ecological constraints* Washington, D. C.: National Academy.
- HOLLING, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 4, 390-405.
- HOLLNAGEL, E.; WOODS, D. D. & LEVENSON, N. C. (2006). *Resilience engineering: Concepts and precepts*, Aldershot, UK, Ashgate.
- HOSSEINI, S.; BARKER, K. & RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47-61.
- HUANG, G.; LI, D.; ZHU, X. & ZHU, J. (2021). Influencing factors and their influencing mechanisms on urban resilience in China. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103210.
- HUSKOVA, I.; MATROSOV, E. S.; HAROU, J. J.; KASPRZYK, J. R. & LAMBERT, C. (2016). Screening robust water infrastructure investments and their trade-offs under global change: A London example. *Global Environmental Change*, 41, 216-227.
- IDEAM (2018). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
- IDEAM (2021). Boletín hidrológico. Cali, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGAC (2021). Estadísticas catastrales. Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- IRWIN, S.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. & NIRUPAMA, N. (2016). ResilSIM—A Decision Support Tool for Estimating Resilience of Urban Systems. *Water*, 8, 377.
- IUCN. (1980). *World Conservation Strategy* [Online]. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), United Nations Environment Programme (UNEP) and World Wildlife Fund (WWF). Available: <http://portals.iucn.org/library/efiles/html/wcs-004/cover.html> [Accessed Marzo 15 2021].
- JACKSON, L. J.; TREBITZ, A. S. & COTTINGHAM, K. L. (2000). An Introduction to the Practice of Ecological Modeling. *BioScience*, 50, 694.
- JHA, A.; BLOCH, R. & LAMOND, J. (2012). *Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*, Washington DC, World Bank.
- JØRGENSEN, S. & BRIAN, F. (2011). *Fundamentals of Ecological Modelling: Applications in Environmental Management and Research*, Amsterda, The Netherlands, Elsevier.
- KARIME, S.-C.; YESID, C.-E. & ÁLVARO JAVIER, Á. D. (2013). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. *Luna Azul*, 219-238.
- KOTZEE, I. & REYERS, B. (2016). Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: A composite index approach. *Ecological Indicators*, 60, 45-53.
- LANSEY, K. (2012). Sustainable, robust, resilient, water distribution systems. *14th Water Distribution Systems Analysis Conference*. Adelaide, Australia.
- LEE, E.; CHOI, Y. & KIM, J. (2019). Real-Time Integrated Operation for Urban Streams with Centralized and Decentralized Reservoirs to Improve System Resilience. *Water*, 11, 69.

- LEE, E. H. & KIM, J. H. (2019). Development of a Reliability Index Considering Flood Damage for Urban Drainage Systems. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 1872-1880.
- LEE, E. H.; LEE, Y. S.; JOO, J. G.; JUNG, D. & KIM, J. H. (2017). Investigating the Impact of Proactive Pump Operation and Capacity Expansion on Urban Drainage System Resilience. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143, 04017024.
- LEHMAN, D. & GROENENDAAL, H. (2020). *Practical Spreadsheet Modeling Using @Risk*, Boca Raton, United States, CRC Press.
- LHOMME, S.; SERRE, D.; DIAB, Y. & LAGANIER, R. (2013). Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step towards more flood resilient cities. *Natural Hazards and Earth System Science*, 13, 221-230.
- LIANG, C.; ZHANG, X.; XU, J.; PAN, G. & WANG, Y. (2020). An integrated framework to select resilient and sustainable sponge city design schemes for robust decision making. *Ecological Indicators*, 119, 106810.
- LIU, D. D.; CHEN, X. H. & NAKATO, T. (2012). Resilience assessment of water resources system. *Water Resources Management*, 26, 3743-3755.
- LIU, W. & SONG, Z. (2020). Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106617.
- LÓPEZ, A.; MÉNDEZ, D.; PAZ, A. & ARBOLEDA, H. (2016). Desarrollo e Instrumentación de un Proceso de Vigilancia Tecnológica basado en Protocolos de Revisión Sistemática de la Literatura. *Información tecnológica*, 27, 155-164.
- MAFTUHAH, D. I.; ANITYASARI, M. & SHOLIHAN, M. (2018). Model of urban water management towards water sensitive city: a literature review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 337, 012047.
- MAHMOUD, R.; HUSSEIN, M. & MAHMOUD, E. (2019). Assessment of Urban Resilience through the Development of an Urban Resilience Assessment Model (Resilience Performance Index). *International Journal of Engineering Research and Technology*, 12, 2423-2430.
- MAKROPOULOS, C.; NIKOLOPOULOS, D.; PALMEN, L.; KOOLS, S.; SEGRAVE, A.; VRIES, D.; KOOP, S.; VAN ALPHEN, H. J.; VONK, E.; VAN THIENEN, P.; ROZOS, E. & MEDEMA, G. (2018). A resilience assessment method for urban water systems. *Urban Water Journal*, 15, 316-328.
- MAKSIMOVIĆ, Č.; PRODANOVIĆ, D.; BOONYA-AROONNET, S.; LEITÃO, J. P.; DJORDJEVIĆ, S. & ALLITT, R. (2010). Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. *Journal of Hydraulic Research*, 47, 512-523.
- MAKSIMOVIC, C.; TODOROVIC, Z. & BRAGA, B. (1993). Urban drainage problems in the humid tropics. *Hydrology of Warm Humid Regions*, 216, 377-401.
- MARKOLF, S. A.; CHESTER, M. V.; EISENBERG, D. A.; IWANIEC, D. M.; DAVIDSON, C. I.; ZIMMERMAN, R.; MILLER, T. R.; RUDDALL, B. L. & CHANG, H. (2018). Interdependent Infrastructure as Linked Social, Ecological, and Technological Systems (SETs) to Address Lock-in and Enhance Resilience. *Earth's Future*, 6, 1638-1659.
- MARSALEK, J.; JIMÉNEZ, B. E.; MALMQUIST, P.; KARAMOUZ, M.; GOLDENFUM, J. & CHOCAT, B. (2006). Urban water cycle processes and interactions. In: HYDROLOGY, I. T. D. I. (ed.). Paris: UNESCO/IHP.
- MARTÍN, B.; GÓMEZ BAGGETUN, E. & MONTES, C. (2009). Un marco conceptual para la gestión de las interacciones naturaleza-sociedad en un mundo cambiante. *Cuadernos*, 3, 229-258.

- MARTÍNEZ, C.; GALVIS, A. & JIMÉNEZ, E. (2011). Calibración de un modelo de drenaje urbano mediante un algoritmo de optimización. *Agua 2011*. Cali: Universidad del Valle.
- MAYS, L. W. (2007). *Water Resources Sustainability*, New York, McGraw Hill.
- MCCLYMONT, K.; FERNANDES CUNHA, D. G.; MAIDMENT, C.; ASHAGRE, B.; VASCONCELOS, A. F.; BATALINI DE MACEDO, M.; NOBREGA DOS SANTOS, M. F.; GOMES JUNIOR, M. N.; MENDIONDO, E. M.; BARBASSA, A. P.; RAJENDRAN, L. & IMANI, M. (2020). Towards urban resilience through Sustainable Drainage Systems: A multi-objective optimisation problem. *J Environ Manage*, 275, 111173.
- MCDANIELS, T.; CHANG, S.; COLE, D.; MIKAWOZ, J. & LONGSTAFF, H. (2008). Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation. *Global Environmental Change*, 18, 310-318.
- MCGINNIS, M. D. & OSTROM, E. (2014). Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society & Natural Resources*, 19.
- MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, F. C. B. & MAGALHÃES, L. P. C. (2007). Multifunctional landscapes for urban flood control in developing countries. *Sustainable Development and Planning II*.
- MIGUEZ, M. G.; PIRES, A. & FERREIRA, P. R. (2012). Sustainable drainage systems: An integrated approach, combining hydraulic engineering design, urban land control and river revitalisation aspects. *Drainage systems*. Rijeka, Croatia: InTech.
- MOGHADAS, M.; ASADZADEH, A.; VAFEIDIS, A.; FEKETE, A. & KÖTTER, T. (2019). A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35, 101069.
- MOHAMMADIUN, S.; YAZDI, J.; HAGER, J.; SALEHI NEYSHABOURI, S. A. A.; SADIQ, R.; HEWAGE, K. & ALAVI GHARAHBAGH, A. (2019). Effects of bottleneck blockage on the resilience of an urban stormwater drainage system. *Hydrological Sciences Journal*, 1-15.
- MONTAÑA, F. (2010). *Selección de tecnología para la recolección y transporte de aguas lluvias y aguas residuales en áreas urbanas*. Tesis de Pregrado, Universidad del Valle. 82 p.
- MOORES, J.; BATSTONE, C. & GREEN, M. (2013). Assessing the Resilience of Water Bodies to the Stormwater-Related Effects of Urban Development. *8th International Water Sensitive Design Conference*. Gold Coast, Australia.
- MOORES, J. & SEMADENI-DAVIES, A. (2015). Assessing resilience in storwater management. *Asia Pacific Stormwater Conference*. Auckland.
- MOORES, J. P.; YALDEN, S.; GADD, J. B. & SEMADENI-DAVIES, A. (2017). Evaluation of a new method for assessing resilience in urban aquatic social-ecological systems. *Ecology and Society*, 22.
- MOTTAHEDI, A.; SERESHKI, F.; ATAELI, M.; NOURI QARAHASANLOU, A. & BARABADI, A. (2021). The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review. *Energies*, 14, 1571.
- MUELLER, J. & STEWART, M. G. (2016). The curse of the Black Swan. *Journal of Risk Research*, 19, 1319-1330.
- MUGUME, S. N. & BUTLER, D. (2016). Evaluation of functional resilience in urban drainage and flood management systems using a global analysis approach. *Urban Water Journal*, 1-10.

- MUGUME, S. N.; DIAO, K.; ASTARAIE-IMANI, M.; FU, G.; FARMANI, R. & BUTLER, D. (2015a). Enhancing resilience in urban water systems for future cities. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15, 1343-1352.
- MUGUME, S. N.; GOMEZ, D. E.; FU, G.; FARMANI, R. & BUTLER, D. (2015b). A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. *Water Res*, 81, 15-26.
- MUMBY, P. J.; CHOLLETT, I.; BOZEC, Y.-M. & WOLFF, N. H. (2014). Ecological resilience, robustness and vulnerability: how do these concepts benefit ecosystem management? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, 22-27.
- MUTHUSAMY, M.; CASADO, M. R.; BUTLER, D. & LEINSTER, P. (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling. *Journal of Hydrology*, 596, 126088.
- NIAZI, M.; NIETCH, C.; MAGHREBI, M.; JACKSON, N.; BENNETT, B. R.; TRYBY, M. & MASSOUDIEH, A. (2017). Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3, 04017002.
- NIEMELÄ, J.; BREUSTE, J. H.; ELMQVIST, T.; GUNTENSPERGEN, G.; JAMES, P. & MCINTYRE, N. E. (2011). *Urban Ecology: Patterns, Processes, and Applications*.
- NING, X.; LIU, Y.; CHEN, J. N.; DONG, X.; LI, W. F. & LIANG, B. (2013). Sustainability of urban drainage management: a perspective on infrastructure resilience and thresholds. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 7, 658-668.
- NORBERG, J. & CUMMING, G. S. (2008). *Complexity theory for a sustainable future*, New York, Columbia University Press.
- NOVOTNY, E. V. (2008). A new paradigm of sustainable urban drainage and water management. *Oxford Roundtable Workshop on Sustainability*. Oxford University, UK.
- OECD (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*, Organization for Economic Co-operation and Development.
- OLADOKUN, V. O. & MONTZ, B. E. (2019). Towards measuring resilience of flood-prone communities: a conceptual framework. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 1151-1165.
- ONU. (1992). *Rio Declaration on Environment and Development* [Online]. Rio de Janeiro. Available: <http://www.un-documents.net/rio-dec.htm> [Accessed Marzo 15 2021].
- ONU. (2002). *Johannesburg Declaration on Sustainable Development* [Online]. Johannesburg. Available: <http://www.un-documents.net/jburgdec.htm> [Accessed Marzo 15 2021].
- ONU (2003). *Ecosystems and Human Well-being: A framework for assessment*. Washington, DC: Island Press.
- ONU. (2015). *2030 Agenda for Sustainable Development* [Online]. New York. Available: <http://sustainabledevelopment.un.org/sdgs> [Accessed Marzo 15 2021].
- PANDIT, A. (2014). *Resilience of Urban Water Systems: An 'Infrastructure Ecology' approach to Sustainable and Resilient (SuRe) Planning and Design*. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology. 142 p.
- PANT, R.; BARKER, K. & ZOBEL, C. W. (2014). Static and dynamic metrics of economic resilience for interdependent infrastructure and industry sectors. *Reliability Engineering & System Safety*, 125, 92-102.
- PARK, J.; SEAGER, T. P.; RAO, P. S.; CONVERTINO, M. & LINKOV, I. (2013). Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems. *Risk Anal*, 33, 356-67.

- PARKINSON, J. & MARK, O. (2015). *Urban Stormwater Management in Developing Countries*.
- PARRIS, T. M. & KATES, R. W. (2003). Characterizing and measuring sustainable development. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 559-586.
- PICKETT, S. T. A.; MCGRATH, B.; CADENASSO, M. L. & FELSON, A. J. (2013). Ecological resilience and resilient cities. *Building Research & Information*, 42, 143-157.
- PROUTY, C.; MOHEBBI, S. & ZHANG, Q. (2020). Extreme weather events and wastewater infrastructure: A system dynamics model of a multi-level, socio-technical transition. *Sci Total Environ*, 714, 136685.
- QASIM, S.; QASIM, M.; SHRESTHA, R. P.; KHAN, A. N.; TUN, K. & ASHRAF, M. (2016). Community resilience to flood hazards in Khyber Pukhthunkhwa province of Pakistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 18, 100-106.
- QUINLAN, A. E.; BERBÉS-BLÁZQUEZ, M.; HAIDER, L. J.; PETERSON, G. D. & ALLEN, C. (2016). Measuring and assessing resilience: broadening understanding through multiple disciplinary perspectives. *Journal of Applied Ecology*, 53, 677-687.
- RAMASWAMI, A.; WEIBLE, C.; MAIN, D.; HEIKKILA, T.; SIDDIKI, S.; DUVAL, A.; PATTISON, A. & BERNARD, M. (2012). A Social-Ecological-Infrastructural Systems Framework for Interdisciplinary Study of Sustainable City Systems. *Journal of Industrial Ecology*, 16, 801-813.
- REZENDE, O. M.; DA CRUZ DE FRANCO, A. B. R.; DE OLIVEIRA, A. K. B.; JACOB, A. C. P. & MIGUEZ, M. G. (2019a). A Framework to Assess Urban Floods Resilience. 533-538.
- REZENDE, O. M.; MIRANDA, F. M.; HADDAD, A. N. & MIGUEZ, M. G. (2019b). A Framework to Evaluate Urban Flood Resilience of Design Alternatives for Flood Defence Considering Future Adverse Scenarios. *Water*, 11, 1485.
- ROSSMAN, L. A. (2015). *Storm Water Management Model user's Manual version 5.1*, Cincinnati, EPA US.
- RUSSO, B.; VELASCO, M.; LOCATELLI, L.; SUNYER, D.; YUBERO, D.; MONJO, R.; MARTÍNEZ-GOMARIZ, E.; FORERO-ORTIZ, E.; SÁNCHEZ-MUÑOZ, D.; EVANS, B. & GÓMEZ, A. G. (2020). Assessment of Urban Flood Resilience in Barcelona for Current and Future Scenarios. The RESCCUE Project. *Sustainability*, 12, 5638.
- SAATY, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, New York, McGraw-Hill.
- SACKMAN, H. (1974). *Delphi Assessment: Expert Opinion, Forecasting, and Group Process* Boston, USA: RAND Pardee Center.
- SALAS, W. A.; RÍOS, L. A. & ÁLVAREZ, J. (2011). Bases conceptuales para una clasificación de los sistemas socioecológicos de la investigación en sostenibilidad. *Revista Lasallista de Investigación*, 8, 136-142.
- SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F. & RATTO, M. (2002). *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*.
- SÁNCHEZ, M. (2010). *Introducción a la confiabilidad y evaluación de riesgos: Teoría y aplicaciones en ingeniería*, Bogotá, Universidad de los Andes.
- SCHELFAUT, K.; PANNEMANS, B.; VAN DER CRAATS, I.; KRYWKOW, J.; MYSIK, J. & COOLS, J. (2011). Bringing flood resilience into practice: the FREEMAN project. *Environmental Science & Policy*, 14, 825-833.
- SCHOLZ, R. W.; BLUMER, Y. B. & BRAND, F. S. (2012). Risk, vulnerability, robustness, and resilience from a decision-theoretic perspective. *Journal of Risk Research*, 15, 313-330.

- SCHUSCHNY, A. & SOTO, H. (2009). Guía metodológica: Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- SCHÜTZE, M.; BUTLER, D. & BRUCE, M. (2002). *Modelling, simulation and control of urban wastewater systems*, London, Springer.
- SEMANA. 2021. Fuertes lluvias generan estragos en Cali: Calles inundadas y árboles caídos. *Revista Semana*, 22 de marzo de 2021.
- SHAKOU, L. M.; WYBO, J.-L.; RENIERS, G. & BOUSTRAS, G. (2019). Developing an innovative framework for enhancing the resilience of critical infrastructure to climate change. *Safety Science*, 118, 364-378.
- SHARMA, D. (2008). Sustainable Drainage System (SUDS) for Stormwater Management: A Technological and Policy Intervention to Combat Diffuse Pollution. *11th International Conference on Urban Drainage*. Edinburgh, Scotland, UK.
- SOTO, J. (2011). Graves inundaciones ocasionadas por río Meléndez. *Informe Técnico*. Santiago de Cali.
- STARR, C. (1979). Risk and Risk Acceptance by Society. *Current issues in energy*.
- SUÁREZ, M. (2012). *La resiliencia de los ecosistemas urbanos: Una propuesta de evaluación para la sostenibilidad*. Tesis de Maestría, Universidades Autónoma y Complutense de Madrid. 41 p.
- SUÁREZ, M.; GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; BENAYAS, J. & TILBURY, D. (2016). Towards an urban resilience index: A case study in 50 spanish cities. *Sustainability*, 8, 774.
- SUPERSERVICIOS (2020). Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado. Bogotá D.C.: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.
- SWEETAPPLE, C.; ASTARAIE-IMANI, M. & BUTLER, D. (2018). Design and operation of urban wastewater systems considering reliability, risk and resilience. *Water Res*, 147, 1-12.
- SWEYA, L. N.; WILKINSON, S.; KASSENKA, G. & LUGOMELA, G. (2021). Development of a Tool for Measuring Resilience of Water Supply Systems in Tanzania: Technical Dimension. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147, 04020107.
- TAHMASEBI BIRGANI, Y. & YAZDANDOOST, F. (2018). An Integrated Framework to Evaluate Resilient-Sustainable Urban Drainage Management Plans Using a Combined-adaptive MCDM Technique. *Water Resources Management*, 32, 2817-2835.
- TAHMASEBI, Y. & YAZDANDOOST, F. (2015). Resilience in urban drainage risk management systems. *Proceedings of the ICE - Water Management*, 1-13.
- TALEB, N. N. (2009). *El cisne negro: el impacto de lo altamente improbable*, Barcelona, Paidós.
- TESHOME, M. & DEVI, A. R. (2020). A Review of Recent Studies on Urban Stormwater Drainage System for Urban Flood Management.
- TOLEDO, E. (2018). *Implementación de una metodología para la calibración y validación de modelos determinísticos en drenaje urbano*. Trabajo de Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. 91 p.
- TUCCI, C. E. M. (2001). Urban drainage management. *Urban Drainage in the Humid Tropics*. Paris: UNESCO International Hydrology Programme (IHP-V).
- TUCCI, C. E. M. (2007). *Gestión de inundaciones urbanas*, Porto Alegre, Brasil.
- TUCCI, C. E. M. (2009). *Integrated urban water management in large cities*.
- UNISDR (2009). Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Ginebra: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

- VAN DER STEEN, P. & HOWE, C. (2009). Managing water in the city of the future; strategic planning and science. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 8, 115-120.
- VAN DUIN, B.; ZHU, D. Z.; ZHANG, W.; MUIR, R. J.; JOHNSTON, C.; KIPKIE, C. & RIVARD, G. (2021). Toward More Resilient Urban Stormwater Management Systems—Bridging the Gap From Theory to Implementation. *Frontiers in Water*, 3.
- VAN WAVEREN, R. H.; GROOT, S.; SCHOLTEN, H.; VAN GEER, F. C.; WÖSTEN, J. H. M.; KOEZE, R. D. & NOORT, J. J. (1999). *Good modelling practice: Handbook*, STOWA.
- VERCRUYSSSE, K.; DAWSON, D. A. & WRIGHT, N. (2019). Interoperability: A conceptual framework to bridge the gap between multifunctional and multisystem urban flood management. *Journal of Flood Risk Management*, 12, e12535.
- WALKER, B.; HOLLIN, C. S.; CARPENTER, S. R. & KINZIG, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9.
- WALKER, B. & SALT, D. (2012). *Resilience practice: Building capacity to absorb disturbance and maintain function*, Island Press.
- WANG, C. H. & BLACKMORE, J. M. (2009). Resilience concepts for water resource systems. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 135, 528-536.
- WANG, H.-H. & GRANT, W. E. (2019). *Ecological modeling: An introduction to the art and science of modeling ecological systems*, Amsterdam, Netherlands, ELSEVIER.
- WANG, S.; FU, J. & WANG, H. (2019a). Unified and rapid assessment of climate resilience of urban drainage system by means of resilience profile graphs for synthetic and real (persistent) rains. *Water Res*, 162, 11-21.
- WANG, Y.; MENG, F.; LIU, H.; ZHANG, C. & FU, G. (2019b). Assessing catchment scale flood resilience of urban areas using a grid cell based metric. *Water Res*, 163, 114852.
- WCED. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future* [Online]. Geneva. Available: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> [Accessed Marzo 15 2021].
- WELSH, M. (2014). Resilience and responsibility: Governing uncertainty in a complex world. *Geographical Journal*, 180, 15-26.
- WESTRUM, R. (2006). A typology of resilience situations. *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Aldershot, UK.: Ashgate Publishing.
- WOODS, B.; WILSON, S.; UDALE-CLARKE, H.; IIIMAN, S.; SCOTT, T.; ASHLEY, R. & KELLAGHER, R. (2015). *The SUDS Manual*. London.
- WOOLF, S.; TWIGG, J.; PARIKH, P.; KARAOGLU, A. & CHEAIB, T. (2016). Towards measurable resilience: A novel framework tool for the assessment of resilience levels in slums. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 19, 280-302.
- XU, L. & KAJIKAWA, Y. (2017). An integrated framework for resilience research: a systematic review based on citation network analysis. *Sustainability Science*, 13, 235-254.
- ZHANG, C.; OH, J. & PARK, K. (2021). Evaluation of sewer network resilience index under the perspective of ground collapse prevention. *Water Science and Technology*.
- ZHOU, Q. Q. (2014). A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water*, 6, 976-992.

- ZHU, S.; LI, D.; FENG, H. & ZHANG, N. (2023). The influencing factors and mechanisms for urban flood resilience in China: From the perspective of social-economic-natural complex ecosystem. *Ecological Indicators*, 147, 109959.
- ZÚÑIGA, L. M. (2018). Resiliencia urbana ante inundaciones por intensas lluvias en contribución al desarrollo urbano equilibrado. *Arquitectura y Urbanismo*, 39, 39-50.

***ANEXOS. CUANTIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA
INTEGRAL (IR)***

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Condición de línea base - SDS de Cali

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	18	0,82	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	4	0,96	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	30	0,70	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	17	0,83	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	4	0,04	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	32	0,68	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	8	0,08	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	4	0,04	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,36
2. Gobernanza	0,05
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,09
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,10
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,09
7. Regulación de inundaciones	0,01
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,47
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,54
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,51

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Condición de línea base - Subcuenca Cañaveralejo

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	42	0,58	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	12	0,88	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	35	0,65	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	21	0,79	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	5	0,05	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	40	0,60	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	5	0,05	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	2	0,02	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,33
2. Gobernanza	0,04
3. Riesgo de inundación	0,11
4. Residuos sólidos en el SDU	0,08
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,09
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,08
7. Regulación de inundaciones	0,01
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,42
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,46
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,44

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Condición de línea base - Subcuenca Lili

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	1	0,99	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	1	0,99	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	17	0,83	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	1	0,99	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	3	0,03	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	35	0,65	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	6	0,06	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	2	0,02	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,41
2. Gobernanza	0,06
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,10
5. Desarrollo económico de la población	0,12
ECOLÓGICO	0,10
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,09
7. Regulación de inundaciones	0,01
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,51
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,85
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,70

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Condición de línea base - Subcuenca Meléndez

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	18	0,82	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	3	0,97	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	34	0,66	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	21	0,79	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	4	0,04	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	20	0,80	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	10	0,10	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	5	0,05	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,35
2. Gobernanza	0,05
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,08
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,12
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,11
7. Regulación de inundaciones	0,02
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,48
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,35
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,41

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Condición de línea base - Subcuenca Ferrocarril

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	17	0,83	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	3	0,97	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	32	0,68	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	20	0,80	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	6	0,06	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	61	0,39	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	4	0,04	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	2	0,02	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,36
2. Gobernanza	0,05
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,09
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,06
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,06
7. Regulación de inundaciones	0,01
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,42
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,38
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,40

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Escenario de amenaza - SDS de Cali

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	18	0,82	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	4	0,96	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	30	0,70	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	17	0,83	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	4	0,04	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	47	0,53	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	4	0,04	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	2	0,02	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,36
2. Gobernanza	0,05
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,09
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,08
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,07
7. Regulación de inundaciones	0,01
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,44
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,50
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,47

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Escenario de amenaza - Subcuenca Cañaveralejo

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	42	0,58	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	12	0,88	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	35	0,65	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	21	0,79	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	5	0,05	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	60	0,40	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	2	0,02	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	1	0,01	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,33
2. Gobernanza	0,04
3. Riesgo de inundación	0,11
4. Residuos sólidos en el SDU	0,08
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,06
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,06
7. Regulación de inundaciones	0,00
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,39
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,43
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,41

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Escenario de amenaza - Subcuenca Lili

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	1	0,99	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	1	0,99	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	17	0,83	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	1	0,99	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	3	0,03	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	52	0,48	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	3	0,03	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	1	0,01	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,41
2. Gobernanza	0,06
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,10
5. Desarrollo económico de la población	0,12
ECOLÓGICO	0,07
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,06
7. Regulación de inundaciones	0,01
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,48
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,75
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,63

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Escenario de amenaza - Subcuenca Meléndez

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	18	0,82	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	3	0,97	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	34	0,66	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	21	0,79	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	4	0,04	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	30	0,70	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	5	0,05	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	2	0,02	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,35
2. Gobernanza	0,05
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,08
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,10
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,09
7. Regulación de inundaciones	0,01
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,46
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,25
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,34

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Escenario de amenaza - Subcuenca Ferrocarril

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	17	0,83	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	3	0,97	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	32	0,68	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	20	0,80	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	6	0,06	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	91	0,09	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	2	0,02	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	1	0,01	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,36
2. Gobernanza	0,05
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,09
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,02
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,02
7. Regulación de inundaciones	0,00
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,38
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,31
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,34

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Estrategias de mitigación - SDS de Cali

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	18	0,82	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	4	0,96	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	30	0,70	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	17	0,83	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	4	0,04	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	16	0,84	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	11	0,11	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	5	0,05	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,36
2. Gobernanza	0,05
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,09
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,13
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,11
7. Regulación de inundaciones	0,02
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,49
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,65
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,58

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Estrategias de mitigación - Subcuenca Cañaveralejo

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	42	0,58	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	12	0,88	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	35	0,65	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	21	0,79	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	5	0,05	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	20	0,80	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	7	0,07	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	3	0,03	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,33
2. Gobernanza	0,04
3. Riesgo de inundación	0,11
4. Residuos sólidos en el SDU	0,08
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,12
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,11
7. Regulación de inundaciones	0,01
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,45
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,73
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,60

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Estrategias de mitigación - Subcuenca Lili

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	1	0,99	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	1	0,99	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	17	0,83	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	1	0,99	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	3	0,03	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	17	0,83	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	9	0,09	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	3	0,03	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,41
2. Gobernanza	0,06
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,10
5. Desarrollo económico de la población	0,12
ECOLÓGICO	0,12
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,11
7. Regulación de inundaciones	0,02
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,54
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,98
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,78

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Estrategias de mitigación - Subcuenca Meléndez

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	18	0,82	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	3	0,97	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	34	0,66	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	21	0,79	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	4	0,04	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	10	0,90	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	15	0,15	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	7	0,07	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,35
2. Gobernanza	0,05
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,08
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,15
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,12
7. Regulación de inundaciones	0,03
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,50
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,60
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,55

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta

Índice de Resiliencia Integral (IR) - Estrategias de mitigación - Subcuenca Ferrocarril

1. VARIABLES E INDICADORES SOCIO-ECOLÓGICAS

Variables	Indicadores	Valor	Valor normalizado	Peso (%)
2. Gobernanza	2.1. Nivel de coordinación institucional (alto, medio o bajo)	Bajo	0,00	6,25
	2.2. Porcentaje de asentamientos informales	17	0,83	6,25
3. Riesgo de inundación	3.1. Porcentaje del área de la cuenca urbana en zona de riesgo alto de inundación	3	0,97	12,50
4. Residuos sólidos en el SDU	4.1. Porcentaje de residuos sólidos en canales y ríos	32	0,68	12,50
5. Desarrollo económico de la población	5.1. Porcentaje de hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	20	0,80	12,50
6. Características físicas de la cuenca urbana	6.1. Pendiente predominante del terreno en porcentaje	6	0,06	12,50
	6.2. Porcentaje de área impermeable	30	0,70	12,50
7. Regulación de inundaciones	7.1. Porcentaje de áreas verdes	6	0,06	12,50
	7.2. Porcentaje de áreas de cuerpos hídricos	3	0,03	12,50

2. FACTORES Y VARIABLES

	Valor
SOCIAL	0,36
2. Gobernanza	0,05
3. Riesgo de inundación	0,12
4. Residuos sólidos en el SDU	0,09
5. Desarrollo económico de la población	0,10
ECOLÓGICO	0,11
6. Características físicas de la cuenca urbana	0,10
7. Regulación de inundaciones	0,01
Resiliencia Socio-Ecológica (RSE)	0,46
Resiliencia Ingenieril (RI)	0,72
Índice de Resiliencia Integral (IR)	0,61

3. INFORMACIÓN

El Índice IR emplea 10 indicadores dentro de 7 variables y 6 factores. Los valores de los indicadores se normalizan en un intervalo de 0-1, para esto los indicadores en porcentaje se dividen por 100 y los indicadores cualitativos se normalizan con el método de categorización de escalas. Para tener en cuenta el efecto positivo o negativo de los indicadores en la IR, a los indicadores con efecto positivo se consideró como resultado el valor normalizado mientras que a los indicadores con efecto negativo se les calcularon sus complementos (1 – valor normalizado). El peso de cada indicador se estimó mediante el método de pesos proporcionales.

El Índice IR se mide en una escala de 0-1 la cual representa:

Valor del Índice	Resiliencia del SDU
0,00 - 0,29	Resiliencia muy baja
0,30 - 0,49	Resiliencia baja
0,50 - 0,69	Resiliencia moderada
0,70 - 0,89	Resiliencia alta
0,90 - 1,00	Resiliencia muy alta