EVALUACIÓN DE LA REDUNDANCIA EN LA GESTIÓN DE LA RESILIENCIA EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO

Presentado por
Edison Andres Dominguez Garzón

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente
Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Santiago de Cali, 2018

EVALUACIÓN DE LA REDUNDANCIA EN LA GESTIÓN DE LA RESILIENCIA EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO

Presentado por
Edison Andres Dominguez Garzón

Trabajo de Grado como requisito para optar al Título de Magister en Ingeniería, con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Director:
Alberto Galvis Castaño, M.Sc.
Instituto CINARA - Universidad del Valle

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente
Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Santiago de Cali, 2018

Nota de Aceptación

_____

_____

_____

_____

Alberto Galvis Castaño M.Sc.
Director

_____

Juan Pablo Rodríguez Sánchez
Jurado

_____

Olgalicia Palmett Plata
Jurado

Santiago de Cali, 2018

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado fue elaborado bajo la dirección del ingeniero Alberto Galvis Castaño M.Sc., a quien agradezco su confianza para dar inicio a este proyecto, el tiempo empleado en sus valiosas asesorías, su apoyo y disponibilidad permanente para culminarlo con éxito.

Al ingeniero Luis Marmolejo Rebellon Ph.D., por sus recomendaciones previas al inicio de la Maestría.

A la Ingeniera Patricia Torres Lozada Ph.D. y al Ingeniero Sergio Blanco MSc., por sus valiosos aportes en las reuniones del grupo de investigación.

A los Ingenieros Héctor García Higuera y Julián Barahona Guzmán por su colaboración en la fase inicial y final de este proyecto respectivamente.

Al grupo de Gestión Integrada de Recursos Hídricos del instituto CINARA.

RESUMEN

El demandar sistemas sostenibles para condiciones futuras hace necesario dotarlos de herramientas que les permitan ser capaces de tolerar perturbaciones manteniendo niveles de servicio aceptables. La redundancia como uno de los factores de la resiliencia, representa la disponibilidad de elementos que son sustituibles o alternos y que pueden activarse cuando se producen interrupciones debido a perturbaciones, convirtiéndose en una forma de abordar la falencia de capacidad de los sistemas de drenaje actuales frente a eventos cada vez mayores que los sistemas no se encuentran en capacidad de controlar y que se ve reflejado en una mayor frecuencia de inundaciones.

En el presente documento se desarrolló una metodología para la evaluación de la redundancia en sistemas de drenaje urbano y se validó preliminarmente en el sistema de drenaje de la cuenca del río Lili, que hace parte del Sistema de Drenaje Sur de la ciudad de Santiago de Cali, encontrando que la metodología ofrece una solución rápida para la evaluación de la redundancia y la óptima localización de alternativas, sin importar el tamaño del sistema, la cantidad de fallas, magnitud y duración de las perturbaciones.

Específicamente para el estudio de caso con una redundancia del 60.86 %, se obtuvo que el uso de escenarios basados en la magnitud de las inundaciones demostró ser el más efectivo para reducir los valores de pérdida de funcionalidad, reduciéndolos hasta en un 62.59 %, a costa de una mayor distribución espacial de la redundancia. El uso de escenarios basados en la duración de las inundaciones demostró ser el más efectivo en general, consiguiendo reducir hasta en un 83.02 % la duración de la inundación y en un 87.79 % el periodo de recuperación del sistema.

PALABRAS CLAVES: redundancia, resiliencia, drenaje urbano, MatSWMM.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 11

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 12

3. OBJETIVOS 13

3.1 Objetivo General 13

3.2 Objetivos específicos 13

4 MARCO TEÓRICO 14

4.1 Sostenibilidad 14

4.2 Gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) 14

4.3 Ciclo urbano del agua 15

4.4 Control de inundaciones en cuencas urbanas 17

4.5 Modelación en sistemas de drenaje urbano 17

5 REVISIÓN DE LITERATURA 18

5.1 Sistemas de drenaje urbano 18

5.2 Resiliencia 19

5.3 Factores de la resiliencia en sistemas de drenaje urbano 20

5.4 Redundancia 22

5.5 Flexibilidad 23

5.6 Resistencia 23

5.7 Metodologías de evaluación de la resiliencia y sus factores 24

5.8 Avances en evaluación de la redundancia en sistemas de drenaje urbano 30

6 METODOLOGÍA 32

6.1 Identificación de factores clave para la evaluación de la redundancia 32

6.2 Desarrollo de modelo conceptual para evaluación de la redundancia 34

6.3 Descripción de la zona de estudio 35
6.3.1 Hidrología 36
6.3.1.1 Estaciones meteorológicas 36
6.3.1.2 Curvas IDF 36
6.3.1.3 Hietogramas asociados a periodos de retorno 37
6.3.1.4 Esquematización del sistema de drenaje de la cuenca del río Lili 38
6.4 Definición de la función de desempeño 39
6.5 Automatización para la aplicación de la curva teórica de desempeño 40
7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 42
7.1 Factores clave para la evaluación de la redundancia 42
7.2 Desarrollo del modelo conceptual para la evaluación de la redundancia 46
7.2.1 Sistema 49
7.2.2 Amenazas 49
7.2.3 Alternativas 52
7.3 Aplicación del modelo 55
7.3.1 Amenaza 56
7.3.2 Generación de escenarios 58
7.3.2.1 Escenarios basados en la magnitud de la inundación 59
7.3.2.2 Escenario basado en la duración de la inundación 62
7.3.3 Selección del mejor escenario 63
7 CONCLUSIONES 65
8 RECOMENDACIONES 67
9 BIBLIOGRAFÍA 68
ANEXOS 74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ciclo urbano del agua 15

Figura 2 Relación entre la cobertura impermeable y la escorrentía superficial 16

Figura 3 Curva teórica de desempeño 21

Figura 4 No linealidad del concepto de resiliencia 23

Figura 5 Modelo conceptual para el análisis de la resiliencia en sistemas socio-ecológicos 24

Figura 6 Modelo conceptual para evaluar la resiliencia en SUD 25

Figura 7 Modelo conceptual para el análisis de la resiliencia en infraestructura 26

Figura 8 Modelo conceptual para la intervención "Safe & SuRe" 27

Figura 9 Modelo conceptual para la intervención "Safe & SuRe" 27

Figura 10 Modelo conceptual para evaluar la resiliencia 28

Figura 11 Modelo conceptual para el análisis de la resiliencia 28

Figura 12 Fallos aleatorios acumulativos en la red de drenaje. 30

Figura 13 Red de drenaje urbano (a) estanque de detención centralizado (b) tanques descentralizados. Fuente: adaptado de (Mugume and Butler, 2015). 30

Figura 14 Red de drenaje urbano simplificada (a) diseño original (b) tanque centralizado (c) tanques descentralizados. Fuente: adaptado de Mugume *et al.*, (2015b). 31

Figura 15 Organización sistemática de la documentación en mapa de ideas - Galaxia 33

Figura 16 Ubicación sistema de drenaje Lili 35

Figura 17 Estaciones meteorológicas asociadas al sistema de drenaje del río Lili 36

Figura 18 Hietogramas para tiempos los tiempos de retorno 2, 5 y 10 años 37

Figura 19 Esquematización de la cuenca del río Lili en SWMM 38

Figura 20 Interacciones básicas en un sistema de drenaje para un evento de precipitación 39

Figura 21 Carpetas y archivos correspondientes al Toolbox MatSWMM. 40

Figura 22 Procesos del grupo de funciones desarrolladas en Matlab..... 41

Figura 23 Proceso de evaluación para alternativas redundantes 42

Figura 24 Relaciones entre los factores de la curva teórica de desempeño..... 43

Figura 25 Condiciones para la evaluación de la redundancia 44

Figura 26 Curva teórica de desempeño para más de un escenario 45

Figura 27 Modelo conceptual general para la evacuación de la redundancia 47

Figura 28 Modelo conceptual para la evacuación de la redundancia desagregado 48

Figura 29 Secuencia metodológica del bloque temático ***Sistema*** 50

Figura 30 Secuencia metodológica del bloque temático ***Amenazas*** (parte 1)..... 50

Figura 31 Secuencia metodológica del bloque temático ***Amenazas*** (parte 2)..... 51

Figura 32 Secuencia metodológica del bloque temático ***Alternativas*** (parte 1) 53

Figura 33 Secuencia metodológica del bloque temático ***Alternativas*** (parte 2) 53

Figura 34 Modelo para la evaluación de la redundancia (secuencia metodológica integrada) 54

Figura 35 Curva de desempeño del sistema ante la amenaza..... 57

Figura 36 Procedimiento para la generación de escenarios basados en (a) magnitud de la inundación (b) duración de la inundación. 58

Figura 37 Curvas de desempeño para escenarios basados en magnitud 59

Figura 38 Curvas de desempeño para escenarios basados en magnitud más favorables 61

Figura 39 Curva de desempeño para el escenario basado en duración 62

Figura 40 Curvas de desempeño más favorables para el sistema..... 64

Figura 41 Comportamiento del porcentaje de mejora para cada factor..... 64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Modelos matemáticos para cuantificar la resiliencia y factores base 29

Tabla 2 Parámetros de las curvas IDF 37

Tabla 3 Efecto de la inclusión de la redundancia como factor de la resiliencia 43

Tabla 4 Localización, cuantificación y duración de inundaciones en el sistema. 56

Tabla 5 Factores del desempeño del sistema ante la amenaza. 57

Tabla 6 Factores del desempeño del sistema. 60

Tabla 7 Escenarios basados en magnitud más favorables para el sistema 61

Tabla 8 Factores del desempeño del sistema. 62

Tabla 9 Escenarios basados en magnitud y duración más favorables para el sistema 63

1. INTRODUCCIÓN

Por lo general las áreas urbanas poseen un alto nivel de impermeabilidad, en temporada de lluvias esta impermeabilidad genera un caudal específico para cada área urbanizada (Chow *et al.,* 1996), la estimación de estos caudales es utilizada para realizar el diseño de los sistemas de drenaje urbano (SUD). Este enfoque tradicional necesita de una nueva visión donde los SUD garanticen la sostenibilidad en condiciones futuras, en las cuales pueden aparecer nuevas amenazas como la variabilidad climática y la rápida urbanización efecto de un crecimiento poblacional acelerado (Butler *et al.*, 2014).

El demandar sistemas sostenibles para condiciones futuras hace necesario dotarlos de herramientas que les permitan ser capaces de tolerar perturbaciones manteniendo niveles de servicio aceptables, lo cual denominamos resiliencia. Por lo cual se requiere de un estudio más amplio de la resiliencia y de cada uno de los factores que la componen para llegar a una valoración integral que permita fortalecer los SUD frente a condiciones ambientales extremas sin colapsar. La redundancia se identifica como uno de los factores de la resiliencia, este factor representa la capacidad adicional de un sistema, con lo cual se convierte en una forma de abordar la falencia de capacidad de los sistemas de drenaje actuales frente a los eventos extremos sin realizar grandes intervenciones sobre la infraestructura existente, por ello la importancia de desarrollar una metodología que permita su evaluación.

Se han planteado diferentes metodologías para evaluar la resiliencia, pero son pocos los estudios que se han centrado en el desarrollo de modelos adecuados para la evaluación de la redundancia en SUD. Estudios realizados por Mugume *et al.,* (2015), en SUD en los que se aplicaron el concepto de redundancia presentaron resultados positivos con mejoras del 32 % en la disminución del volumen de inundación y del 27 % en la disminución de la duración de la inundación.

En el presente documento se desarrolló una metodología para la evaluación de la redundancia en SUD y se validó preliminarmente en el sistema de drenaje de una cuenca de la ciudad de Santiago de Cali, que hace parte del Sistema de Drenaje Sur, con lo cual se busca generar conocimiento que permita apoyar la gestión del drenaje urbano, brindando más elementos de juicio para la planificación y gestión de los SUD. Este proyecto de investigación se encuentra enmarcado dentro del proyecto “Gestión de la Resiliencia en Drenaje Urbano” financiado por Colciencias–Convocatoria 745 de 2016 y la Universidad del Valle, ejecutado mediante el grupo de investigación en Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) del instituto CINARA y el grupo de Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA) de la Universidad del Valle.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el Fondo de Población de las Naciones Unidas (UNFPA, 2007) y el Departamento de Economía y Asuntos Sociales de las Naciones Unidas (DESA, 2009) más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y se espera que esta proporción siga aumentando de forma acelerada. Esta situación no sólo tiene y tendrá repercusiones en el ámbito urbano sino también en el resto del planeta. En los últimos treinta años se han presentado en Colombia alrededor de 8.000 casos de inundaciones, dejando miles de damnificados. De acuerdo con el Instituto de Estudios Ambientales (IDEAM) y la Dirección General de Prevención y Atención a Desastres (DGPAD), estos eventos dejaron 21.033 víctimas fatales, 5.064 heridos, 24.727 desaparecidos, 6.753.189 damnificados y 34.731 edificaciones destruidas (Restrepo, 2016).

El escurrimiento en las cuencas está determinado por el incremento de la impermeabilización y la reducción de la infiltración, debido al revestimiento del suelo como consecuencia de la construcción de nuevas urbanizaciones, pavimentación de calles y la remoción de la cobertura vegetal. Estos factores incrementan el volumen y la velocidad de escorrentía, produciendo caudales pico cada vez mayores que los sistemas tradicionales no se encuentran en capacidad de controlar, lo cual se ve reflejado en una mayor frecuencia de inundaciones. El principio fundamental de los sistemas de drenaje consiste en drenar lo más eficiente y rápido posible estos caudales, ya sea producto de actividades antropológicas o naturales. Este principio, se ha convertido en las últimas décadas en un problema para la gestión de las aguas urbanas, pues los SUD además de ser sostenibles para las condiciones para las cuales fueron construidos, deberán ser sostenibles para las condiciones futuras en las cuales pueden aparecer nuevas amenazas (Butler *et al.*, 2014).

En este contexto, surge la necesidad de tener sistemas con la capacidad de tolerar perturbaciones sin colapsar, por esta razón se aplica el concepto de resiliencia dentro del cual se identifica la redundancia como uno de sus factores; la redundancia comprende la disponibilidad de elementos que son sustituibles o alternos y que pueden activarse cuando se producen interrupciones debido a perturbaciones, permitiendo que las funciones vitales del sistema continúen (Pandit, 2014; Mugume *et al.*, 2015).

Por lo anterior se plantea el interrogante de si el campo que deja abierto la redundancia para el análisis de nuevas alternativas puede ser utilizado para proponer un modelo conceptual que involucre los elementos esenciales de un sistema de drenaje urbano y los factores clave para su evaluación, permitiendo identificar configuraciones y distribuciones espaciales óptimas para conseguir que dichas alternativas alcancen su máxima eficiencia mejorando la redundancia y por tanto la resiliencia de este tipo de sistemas; modelo que de acuerdo a experiencias que diversos investigadores han tenido con otros factores de la resiliencia sería posible operativizar y automatizar para facilitar el proceso de validación. Lo anterior buscando disminuir por medio de una correcta planificación los efectos que las inundaciones tienen sobre los centros urbanos.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Proponer y validar preliminarmente una metodología para la evaluación de la redundancia en la gestión de la resiliencia en sistemas de drenaje urbano.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar los factores claves en la evaluación de la redundancia en la gestión de la resiliencia en sistemas de drenaje urbano.
- Plantear un modelo conceptual para evaluar la redundancia en la gestión de la resiliencia en sistemas de drenaje urbano.
- Aplicar el modelo planteado para evaluar la redundancia en la gestión de la resiliencia en sistemas de drenaje urbano en un sistema de drenaje de la ciudad de Cali.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Sostenibilidad

El concepto de sostenibilidad surgió por primera vez en 1974 en el World Council of Churches en Bucarest (Hallman, 1997). El término fue utilizado en 1980 por el programa WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza) y el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) y se definió como "la integración de la conservación y el desarrollo para asegurar que las modificaciones al planeta aseguren a la vez la sobrevivencia y el bienestar de la población" (UICN, 2007). Uno de los primeros intentos de introducir el concepto de sostenibilidad se encuentra en el informe de la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo, conocido como informe Brundtland (1987): *"El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades".* Este informe abrió las vías políticas para el reconocimiento mundial de los términos sostenibilidad y desarrollo sostenible (Vilches *et al.*, 2010).

Particularmente con referencia a los recursos hídricos Mays (2007), presenta la siguiente definición de sostenibilidad: *"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 desastres naturales y humanos que afectan la sostenibilidad de la vida"*.

4.2 Gestión integrada del recurso hídrico (GIRH)

La Global Water Partnership (GWP) define la GIRH, como: "un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales" (GWP, 2008). En otras palabras, la GIRH significa que todos los usos del agua deben ser considerados de forma integrada para su administración, aprovechamiento y conservación. Lo anterior implica que la distribución del agua y las decisiones de gestión deben considerar los efectos de cada uno de los usos, sin detrimento entre ellos, buscando un equilibrio entre la extracción del agua del sistema hídrico, la alteración de la calidad del agua del sistema por descargas puntuales o difusas de aguas residuales y la búsqueda de soluciones conjuntas (GWP, 2013).

Pero la GIRH no se limita a la gestión de recursos físicos, sino que se implica también en la reforma de los sistemas humanos con el fin de habilitar a la población para que los beneficios derivados de dichos recursos reviertan en ellos. Bajo esta premisa, la GIRH alcanza una dimensión social, ambiental y económica, que interactúa con diversas áreas del conocimiento (GWP, 2011).

4.3 Ciclo urbano del agua

El agua en ambientes urbanos presenta síntomas alarmantes de deterioro debido a los impactos que la urbanización tiene en el medio ambiente y la necesidad de proveer servicios relacionados con el agua a su población, incluyendo, abasto, recolección, drenaje y manejo de las aguas (Castrillón, 2014). El deterioro general tanto en la calidad como la cantidad de los volúmenes de agua disponibles en el planeta, deterioran cada vez más, el delicado equilibrio establecido entre el resto de la fauna y la flora y las reservas de agua. Este proceso continuo de precipitaciones, escorrentía, depósito, evaporación y evapotranspiración, se ve gravemente amenazado por la actividad humana (Alvis, 2014), como consecuencia de esto el ciclo hidrológico del agua es mucho más complejo en las ciudades donde se denomina ciclo urbano del agua (Marsalek *et al.*, 2013), el cual se presenta en la Figura 1.

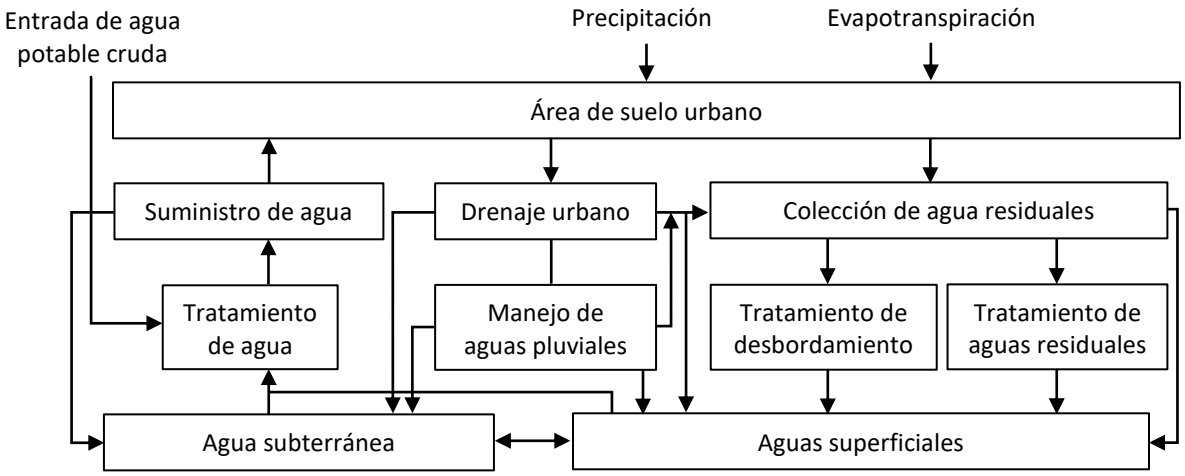


Figura 1 Ciclo urbano del agua
Fuente: Marsalek *et al.*, (2013)

Aplicar la hidrología en áreas urbanas hace necesario inicialmente, conocer la cuenca hidrográfica o cuenca de drenaje en estudio, la cual corresponde al área limitada por un contorno al interior del cual las aguas lluvias que caen se dirigen hacia un mismo punto de salida o de interés particular, luego conocer el comportamiento de un evento de precipitación cuando cae sobre la vegetación y/o zonas urbanizadas, en este último caso ocurren dos cambios importantes.

Primero, aumenta el escurrimiento superficial al incrementarse las áreas impermeables, dirigiéndose mucho más rápido a cauces naturales o artificiales de agua. Así, sobre superficies impermeables las pequeñas tormentas producirán escurrimientos apreciables, que no ocurren en superficies permeables. Segundo, la existencia de conductos artificiales para transportar las aguas, los cuales son, por lo general, más eficientes hidráulicamente que los cauces naturales, producen un aumento en la velocidad del agua y, por lo tanto, un incremento en los caudales máximos (Delgado and Pullido, 2005).

El hombre interviene de manera directa y poco sensible en la explotación del recurso, habiendo pasado de una extracción prácticamente exclusiva para sus necesidades, a una explotación masiva para diversas actividades productivas de tipo industrial, agrícola, pecuaria o recreativa y desentendiéndose de la responsabilidad del diferencial de calidad de agua tomada y aquella que debe ser devuelta a la naturaleza (Alvis, 2014).

El desarrollo urbano incrementa significativamente la cantidad de aguas de escurrimiento y la frecuencia de eventos hidrológicos extremos en las cuencas de las ciudades. El incremento del escurrimiento ocasiona inundaciones locales más intensas, y las sequías durante periodos secos son más largas y críticas (Marsalek *et al.*, 2013). En la Figura 2, se presenta como el balance hídrico es modificado a través de la urbanización, allí se observa como el aumento de la cobertura impermeable en una cuenca genera un aumento de la escorrentía superficial.

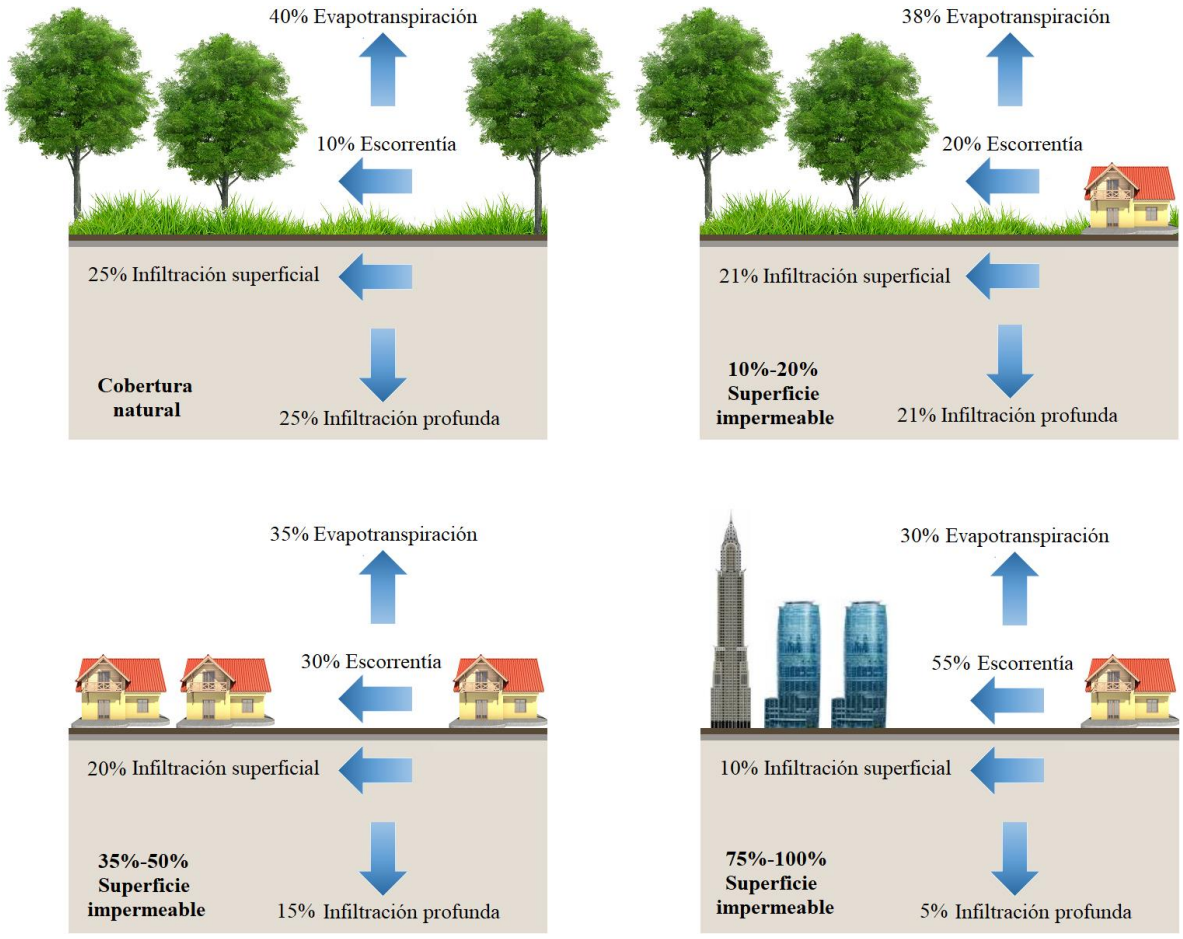


Figura 2 Relación entre la cobertura impermeable y la escorrentía superficial
Fuente: adaptado de FISRWG (2000)

4.4 Control de inundaciones en cuencas urbanas

Las inundaciones han sido señaladas como el desastre más común durante la última década (IFRC, 2016). Este hecho es particularmente relevante en las grandes ciudades, donde la concentración de personas y bienes aumenta el nivel de vulnerabilidad a tales eventos y especialmente en los países en desarrollo donde el crecimiento urbano ha sido significativo y desorganizado (Courty *et al.*, 2016). Adicionalmente el cambio de las condiciones climáticas que cada vez son más extremas ocasionan que los sistemas de drenaje que fueron concebidos en un inicio para una porción de área impermeable definida ahora tengan áreas tributarias con mayores coeficientes de retorno, ocasionando el colapso de los sistemas, lo que a su vez produce inundaciones con efectos económicos y de riesgo sobre la vida de los habitantes, aun así en Colombia y muchos otros países no se cuenta con ningún tipo de normatividad en la que se obligue a controlar los picos producidos por nuevas urbanizaciones (CIACUA, 2004).

Diversos estudios se han realizado sobre el control de inundaciones en cuencas urbanas, la mayoría de ellos se han centrado en soluciones que atienden eventos de precipitación máxima puntuales sin tener en cuenta que la variabilidad climática presenta una alta probabilidad de ocasionar periodos de sequía más prolongados y eventos de precipitación con mayor magnitud y duración.

4.5 Modelación en sistemas de drenaje urbano

La simulación es el proceso de diseñar o implementar un modelo de un sistema real, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar diferentes escenarios para una realidad propuesta dentro de unos límites impuestos por ciertos criterios. Para llevar a cabo una simulación se emplea por lo general un modelo, ya sea que se cree o se emplee uno existente. La modelación es una representación matemática simplificada de un fenómeno físico observable (Jiménez, 2012). Un modelo de simulación de drenaje urbano tiene como objetivo predecir el comportamiento de un sistema hidrológico y encontrar soluciones eficaces a los problemas estructurales y de funcionamiento para analizar el rendimiento hidráulico de la red física con una precisión aceptable que permita la toma de decisiones de ingeniería (Alvis, 2014).

Desde los años 70 se han aplicado modelos para simular eventos de lluvia y el escurrimiento para controlar inundaciones y optimizar los sistemas de drenaje (Li *et al.*, 2011). Respecto a los sistemas de alcantarillado entre los más actuales se encuentran APyS, HYDRA, ALCONW, CIVIL ADS, HIDROWORKS, SEWERGEMS, SEWERCAD, SEWERUP y SWMM. Cada uno con sus ventajas y desventajas en cuanto a cálculos específicos e integración con sistemas CAD y/o SIG. Este tipo de software se utiliza con la finalidad de analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones (escenarios), lo cual es de gran importancia en el proceso de planeación (Castrillón, 2014).

5 REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Sistemas de drenaje urbano

Los sistemas de drenaje son un componente vital de la infraestructura urbana, cuyo objetivo es mantener la salud y seguridad públicas (Sanchez, 2013), por medio de elementos que permitan el normal desarrollo de las actividades cotidianas al recolectar, transportar y disponer lo más eficiente y rápido posible los caudales producidos, ya sean producto de actividades antropológicas o naturales (Jiménez, 2012). En las áreas urbanas los sistemas de drenaje incluyen el transporte del agua residual y el transporte del agua lluvia. En general, la producción de agua residual depende principalmente del nivel de vida, la densidad poblacional, los hábitos y las características del servicio de acueducto, mientras la producción de agua lluvia depende del clima y la geología (Sanchez, 2013).

De acuerdo al tipo de agua que conducen los sistemas de drenaje pueden clasificarse en combinados, semi combinados y separados. Los sistemas combinados transportan el agua residual y el agua lluvia por un solo conducto, por lo general en tiempo seco este caudal es conducido a una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y cuando se presenta un evento de lluvia que supera la capacidad de los conductos combinados el exceso del flujo es derivado a canales y finalmente a cuerpos receptores. Los sistemas semi-combinados conducen el total del agua residual y un porcentaje menor del agua lluvia de manera ocasional como alivio al sistema pluvial para disminuir el riesgo de inundación (Villalobos, 2012). Los sistemas separados son diseñados para transportar el agua residual y el agua lluvia por conductos independientes, hasta la PTAR en el caso del agua residual y hasta cuerpos receptores sin ningún tipo de tratamiento en el caso del agua lluvia (Marsalek *et al.*, 2013).

Aunque los sistemas de drenaje mencionados anteriormente han sido ampliamente aceptados y se han empleado durante mucho tiempo (Novotny, 2008), con el crecimiento de la población y las tendencias de urbanización actuales se están generando cambios en el ciclo hidrológico natural, que afectan el funcionamiento de los sistemas de drenaje y aumentan la frecuencia de los eventos de inundación (Sharma, 2008). Este es el resultado de modificaciones en la cobertura natural del terreno con materiales impermeables que generan menor infiltración y una rápida escorrentía, adicionalmente el cambio climático está causando alteraciones en la intensidad natural de las precipitaciones, lo que se ve reflejado en mayores volúmenes lluvia en menores intervalos de tiempo, provocando daños materiales, pérdidas económicas y sociales (Sanchez, 2013).

El desarrollo de un sistema de drenaje es complejo y requiere de una gran inversión para la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento durante todo el periodo de diseño. Entre los factores que afectan la inversión están los diámetros, las profundidades de instalación, la construcción y operación de estructuras y el uso de estaciones de bombeo; factores que a su vez dependen de la distribución espacial del uso del suelo, la topografía, las corrientes naturales y la red de carreteras. La combinación de estas variables, las restricciones impuestas por la topografía y el tamaño de los sistemas hacen que sea difícil analizarlos manualmente, por lo que se requiere de herramientas computacionales (Sanchez, 2013).

5.2 Resiliencia

El uso del concepto de resiliencia se deriva de la ecología (Klijn and Marchand, 2000). La cuestión central en la ecología de sistemas abordada en los años 70's y 80's fue como explicar la aparente estabilidad o persistencia de ecosistemas complejos (De Bruijn, 2005). En este contexto, Holling (1973), introdujo el concepto de "sistemas resilientes", dentro del cual se define la resiliencia como la capacidad de un sistema de mantener o recuperar su funcionalidad cuando está sujeto a perturbaciones; un concepto aplicable a sistemas complejos con condiciones cambiantes (Da Silva and Moench, 2014). En la definición de resiliencia, la recuperación de un sistema no significa que se regresa a un mismo estado inicial, significa que los impactos negativos de la perturbación han pasado, de esta forma se incorpora el hecho que la mayoría de los sistemas son dinámicos y no vuelven a un equilibrio estable (De Bruijn, 2005).

Años después, Holling (1996), clasificó la resiliencia en dos categorías "resiliencia ingenieril" y "resiliencia ecológica". La resiliencia ingenieril fue definida como el tiempo de retorno a un estado de equilibrio después de una perturbación y se caracteriza por analizar periodos de retorno y eficiencia, enfocándose en la capacidad de recuperación del sistema en un contexto de equilibrio estable; la resiliencia ecológica por su parte, enfatiza en la inestabilidad que puede mover al sistema a otro régimen de comportamiento, definiéndose como la magnitud de la perturbación que puede ser absorbida antes que el sistema redefina su estructura funcional cambiando las variables y procesos que controlan el comportamiento y se caracteriza por analizar la capacidad de amortiguación, resistencia y mantenimiento de funciones, enfocándose en la robustez del sistema en un contexto de estabilidad global.

Posteriormente, argumentando que la resiliencia de un sistema necesita ser considerada en términos de los atributos que gobiernan las dinámicas del sistema, Walker *et al.,* (2004), reclasificaron el concepto de resiliencia adicionando una tercera categoría denominada resiliencia socio-ecológica que se caracteriza por analizar las interacciones entre perturbaciones y reorganización, sostenimiento y desarrollo en el sistema, enfocándose en la capacidad de adaptación, transformabilidad, aprendizaje e innovación en un contexto de equilibrio inestable. En este contexto, se define la resiliencia socio-ecológica 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.

Este concepto modifico el pensamiento que considera a 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 de resiliencia es la más amplia al brindar la posibilidad de involucrar aspectos sociales y ecológicos, centrándose no solo en los componentes de los sistemas sino también en sus interacciones y retroalimentaciones (Walker *et al.*, 2004). La aplicación del concepto de resiliencia en diversas áreas del conocimiento se encuentra en investigación exploratoria bajo un rápido desarrollo con implicaciones políticas para el desarrollo sostenible (Blanco *et al.*, 2017).

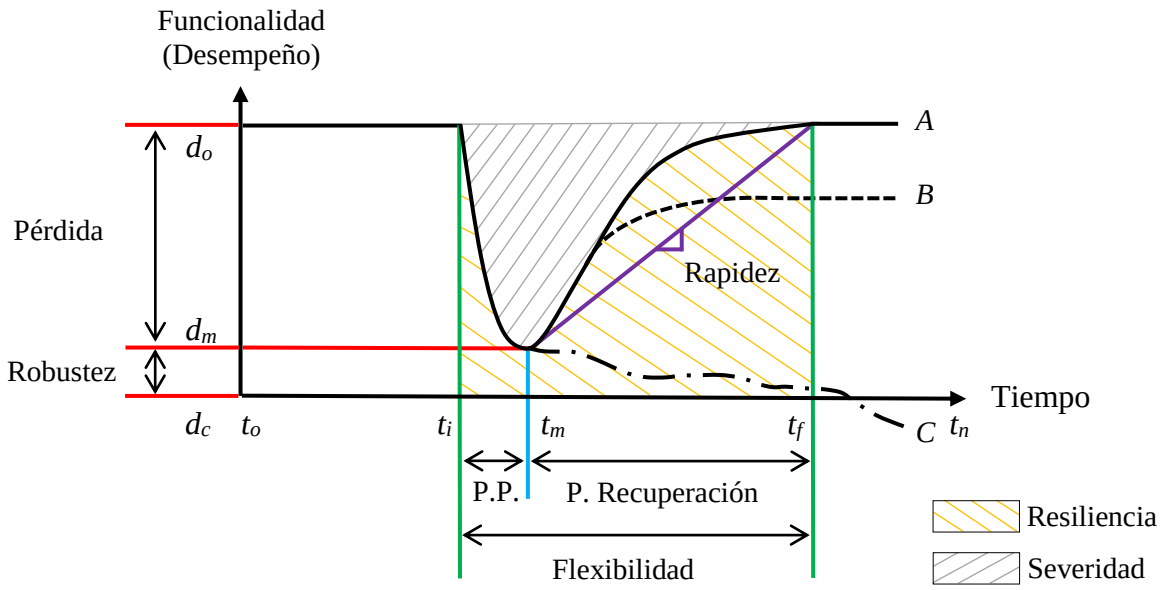
5.3 Factores de la resiliencia en sistemas de drenaje urbano

Las capacidades de absorción y restablecimiento descritas en la resiliencia han generado un creciente interés en los contextos de ingeniería, refiriéndose a comunidades y sistemas de redes urbanas (Tahmasebi and Yazdandoost, 2014), donde se busca mejorar la resiliencia de la infraestructura urbana frente a la rápida urbanización y el aumento de las incertidumbres asociadas al cambio climático, dinámicas poblacionales, dinámicas culturales y eventos atípicos (Park *et al.*, 2013). Bajo este enfoque, la ciudad se entiende como un sistema, donde hay una estrecha interacción entre sociedad y naturaleza en riesgo (Escalera and Ruiz, 2011).

En el campo del drenaje urbano la resiliencia puede definirse como aquella capacidad que tienen los sistemas de afrontar eventos que afectan la dinámica urbana (Ultramari and Denis, 2007), por lo que se reconoce como fundamental para mantener y mejorar los niveles de protección en los sistemas, lo que contribuye a su sostenibilidad (Butler *et al.*, 2014; Mugume, 2015). Al ser la resiliencia una característica que refleja la forma en que los sistemas reaccionan a las perturbaciones se pueden presentar los siguientes casos: i. El sistema no reacciona; ii. El sistema reacciona, pero regresa a la situación de equilibrio; iii. El sistema reacciona y se convierte en otra situación estable; y iv. El sistema no regresa a ninguna situación estable. Estos cuatro casos implican un equilibrio estático, sin embargo, los sistemas rara vez son estáticos, debido a que se desarrollan y cambian continuamente. Por lo tanto, no tendrán un cierto estado de equilibrio al que regresen (Holling, 2000).

Las investigaciones alrededor de la resiliencia han permitido identificar que está compuesta por diversos factores que permiten describir su comportamiento, entre los cuales se reconocen como factores base, la pérdida, la robustez, y la flexibilidad (Ouyang *et al.*, 2012; Hosseini *et al.*, 2016). La pérdida se define como la caída máxima de la funcionalidad del sistema después de iniciado un evento (Cimellaro *et al.*, 2010); la robustez se define como la capacidad de un sistema de soportar un evento antes de alcanzar un umbral de colapso que impida al sistema regresar a condiciones de servicio aceptable, por lo que se puede afirmar que la robustez es la funcionalidad residual después de iniciado un evento y que esta contribuye a la resiliencia de un sistema al reducir la severidad o pérdida de resiliencia (Hwang *et al.*, 2015; Cimellaro, 2016); por su parte la flexibilidad se define como el tiempo requerido para alcanzar la recuperación de la funcionalidad de manera oportuna desde el inicio del fallo hasta un estado de estabilidad y se compone del periodo de propagación y el periodo de recuperación (Bruneau and Reinhorn, 2007).

La interacción de los factores base da lugar a nuevos factores que debido a su complejidad han sido menos estudiados, estos son la redundancia (alternativas estructurales) (Pandit, 2014; Mugume, 2015); la recursividad (alternativas no estructurales) (Wang and Blackmore, 2009; Pandit, 2014) y la rapidez (tasa de recuperación) asociada a la pérdida máxima de funcionalidad y al periodo de recuperación (Cimellaro *et al.*, 2010). A diferencia de la redundancia y la recursividad los demás factores de la resiliencia han sido representados mediante una curva teórica de desempeño, que ha sido utilizada en numerosas investigaciones para el análisis de la resiliencia y la severidad en SUD, dicha representación se presenta a continuación en la Figura 3.



t_o: momento de inicio del evento	t_n: periodo de análisis	**PP**: periodo de propagación
t_i: momento de inicio de la falla	d_o: desempeño inicial	***A***: estado de recuperación
t_m: momento de máxima pérdida	d_m: desempeño mínimo	***B***: estado de pérdida
t_f: momento de recuperación	d_c: umbral de colapso	***C***: estado de colapso

Figura 3 Curva teórica de desempeño
Fuente: adaptado de (Cimellaro *et al.*, 2010; Mens *et al.*, 2011; Ouyang *et al.*, 2012)

La Figura 3, muestra la relación de la pérdida con la flexibilidad que da origen a la severidad, de la robustez con la flexibilidad que da origen a la resiliencia y de la pérdida con el periodo de recuperación que da origen a la rapidez, con estas relaciones la curva teórica de desempeño permite analizar el comportamiento de un sistema de drenaje ante perturbaciones, para un único evento o múltiples eventos, con la condición de conocer el estado inicial del sistema para cada periodo de análisis (Tran *et al.*, 2017).

Adicional a los posibles estados finales de un sistema de drenaje después de una perturbación descritos anteriormente, existe un estado en el cual el sistema es capaz de superar la funcionalidad o desempeño inicial previo a la perturbación, consiguiendo así aumentar su resiliencia (Cimellaro *et al.*, 2010; Mens *et al.*, 2011), para llegar a este estado es necesario solucionar problemas preexistentes en los sistemas por medio de la implementación de alternativas de robustez o redundancia (Anderies *et al.*, 2013; Mugume, 2015), y el factor recursividad que representa la capacidad de identificar problemas y actuar para establecer prioridades cuando existen condiciones que amenazan al sistema (Da Silva *et al.*, 2012; Mugume, 2015); ambos factores son reconocidos como de gran importancia en el estudio de la resiliencia en SUD, pero no se cuenta con modelos que permitan analizar su comportamiento en este tipo de sistemas (Ayyub, 2014).

5.4 Redundancia

La redundancia hace referencia a la capacidad de repuesto creada a propósito y sistemas de respaldo, lo que implica tener un exceso de capacidad que comprende la disponibilidad de elementos alternos que permiten que las funciones vitales del sistema continúen en caso de perturbaciones (Hassler and Kohler, 2014). Este factor supone que es menos probable que se experimente un colapso a raíz de las tensiones o fracasos de alguna infraestructura, por medio de múltiples formas de cumplir una función particular (Pandit, 2014; Mugume, 2015); las redundancias deben ser intencionales, rentables y no deben ser una externalidad de un diseño ineficiente (Da Silva and Moench, 2014).

Al representar la capacidad de utilizar recursos alternativos, cuando los principales son insuficientes o inexistentes, la redundancia se convierte en un factor importante para cumplir con el objetivo de la resiliencia, a pesar de esto es uno de los factores menos considerados debido a su reciente incorporación relacionada principalmente con la evaluación de la resiliencia de sistemas de agua urbana (Mugume, 2015), donde se ha evaluado mediante métricas como el coeficiente de agrupamiento y el coeficiente de enmallado (Yazdani *et al.*, 2011). En el caso de los sistemas de drenaje, algunos autores optan por evaluar el efecto de alternativas redundantes por medio de la cuantificación de la magnitud y la duración de una perturbación, utilizando la resiliencia como un indicador de la efectividad de las alternativas aplicadas (Mugume, 2015).

La evaluación de la redundancia requiere de la consideración de una amplia gama de amenazas que contribuyen a las inundaciones urbanas, estas se clasifican en amenazas funcionales y amenazas estructurales. Las fallas funcionales normalmente ocurren cuando se producen lluvias excepcionales con intensidades que exceden la capacidad de transporte de flujo del sistema o si la capacidad de entrada es insuficiente para capturar la escorrentía superficial (Houston *et al.*, 2011; Maksimović *et al.*, 2009; Ten Veldhuis, 2010). También pueden ocurrir después de lluvias de menor intensidad durante periodos más largos, especialmente si la superficie del suelo es altamente impermeable (Houston *et al.*, 2011).

A diferencia de las fallas funcionales que son causadas por amenazas externas, las fallas estructurales son causadas por amenazas internas. En los SUD, las fallas estructurales pueden ser el resultado del mal funcionamiento de uno o varios componentes que conducen a la incapacidad de un componente para cumplir su función en forma total o parcial (Mugume *et al.*, 2015). Dentro de las alternativas para conseguir o aumentar la redundancia en los sistemas de drenaje, están todas aquellas orientadas a almacenar volúmenes de lluvia o aumentar los tiempos de concentración para evitar caudales pico que estén por encima de la capacidad del sistema de drenaje. Por ello los sistemas de drenaje urbano sostenibles (SUDS), un enfoque que consiste en reproducir de la manera más fiel posible, el ciclo urbano del agua, con el objetivo de minimizar los impactos del desarrollo urbano en cuanto a la cantidad y la calidad de la escorrentía (Sharma, 2008), se consideran como opciones para evaluar en estudios relacionados con la redundancia.

5.5 Flexibilidad

La flexibilidad es el factor más estudiado debido a que en principio este factor se asociaba directamente al concepto de resiliencia, lo cual ha ido cambiando con la incorporación de factores adicionales. Este factor evalúa la capacidad de recuperación y está asociado con el tiempo de falla, la confiabilidad y la velocidad de recuperación del sistema desde una visión de gestión del riesgo (Blanco *et al.*, 2017). La flexibilidad permite cuantificar la capacidad de cambiar, evolucionar y adoptar estrategias alternativas (a corto o largo plazo) en respuesta a las condiciones cambiantes; implica reconocer cuando no es posible retornar a la condición anterior, buscando nuevas soluciones y estrategias (Bruneau and Reinhorn, 2007).

De acuerdo con Bruneau and Reinhorn (2007), la flexibilidad corresponde a la capacidad de un sistema para recuperar su funcionalidad de manera oportuna y adaptarse cuando se ve afectado por perturbaciones que puedan afectar su funcionamiento, siendo de gran utilidad para diferenciar eventos con igual valor de severidad o resiliencia, lo cual se conoce como no linealidad, la representación de este concepto se presenta a continuación en la Figura 4.

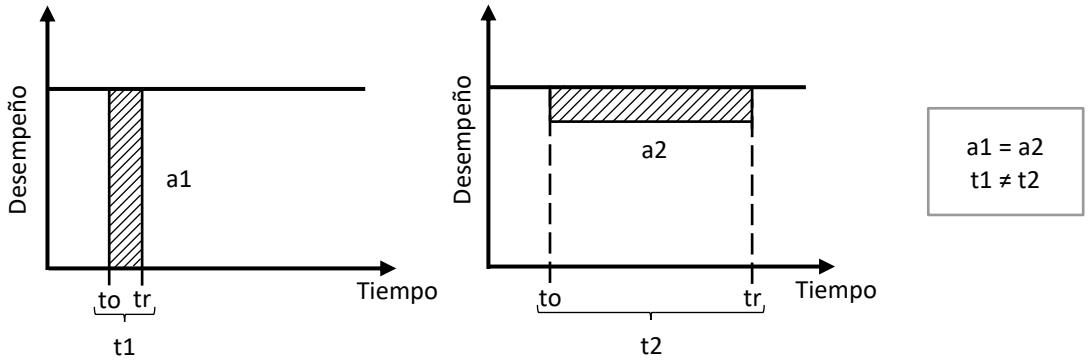


Figura 4 No linealidad del concepto de resiliencia
Fuente: adaptado de Bruneau and Reinhorn (2007)

5.6 Resistencia

La existencia de perturbaciones que son totalmente absorbidas por un sistema dan lugar a el concepto de resistencia, el cual en términos de la gestión del riesgo por inundación, puede definirse como la capacidad de dicho sistema para prevenir inundaciones (De Bruijn, 2004), por lo cual un sistema resistente es aquel que no reacciona en absoluto a las perturbaciones, debido a esto no se presenta un periodo de recuperación. Walker *et al.*, (2004), define la resistencia como la facilidad o dificultad de cambiar un sistema y la identifica como una de las características que constituyen la resiliencia.

Holling (1973), considera la resistencia y la resiliencia características que hacen que un sistema sea estable, por lo cual la reacción de un sistema a una perturbación depende de su capacidad resistencia y resiliencia. Un sistema pueden describirse por la amplitud de las reacciones a las perturbaciones, por las tasas de recuperación y por la gradualidad del aumento de la reacción con magnitudes de perturbación crecientes (De Bruijn, 2005).

5.7 Metodologías de evaluación de la resiliencia y sus factores

Desde que surgió el concepto de resiliencia se han desarrollado numerosas metodologías para su evaluación, en este sentido Hosseini *et al.*, (2016), clasifica el procedimiento para evaluar la resiliencia en metodologías cualitativas y cuantitativas. Las metodologías cualitativas incluyen métodos que tienden a evaluar la resiliencia del sistema sin descriptores numéricos, entre las metodologías cualitativas más utilizadas se encuentran los modelos conceptuales, los cuales proporcionan ideas acerca de la evaluación de la resiliencia, pero no proporcionan un valor de manera directa. Las metodologías cuantitativas se basan en métodos que buscan valores numéricos para describir el comportamiento de la resiliencia, entre las metodologías cuantitativas más utilizadas se encuentran las mediciones realizadas a través de modelos matemáticos que normalmente cuantifican la resiliencia de un sistema antes y después de haber sido afectados por una perturbación (Blanco *et al.*, 2017).

Para evaluar la resiliencia cualitativamente Walker *et al.*, (2002), desarrollaron un modelo conceptual basado en aspectos de manejo adaptivo y planeación de escenarios. Este modelo busca revelar cómo un sistema puede hacerse resiliente a grandes perturbaciones siendo capaz de renovarse o reorganizarse, para ello se emplean una variedad de modelos simples y otros medios para describir la dinámica del sistema, identificar sus componentes y como estos pueden perderse o mejorarse. En la Figura 5, se presenta el modelo conceptual propuesto por Walker *et al.*, (2002), para el análisis de la resiliencia en sistemas socio-ecológicos.

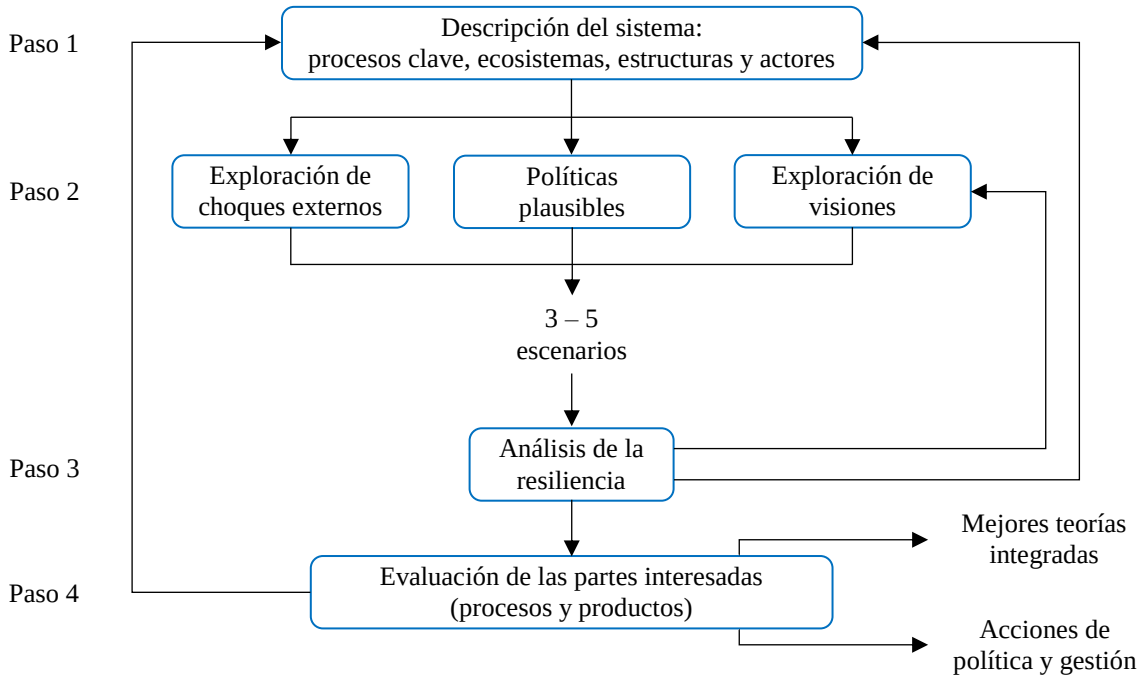


Figura 5 Modelo conceptual para el análisis de la resiliencia en sistemas socio-ecológicos
Fuente: Walker *et al.*, (2002)

Tahmasebi *et al.*, (2014), desarrollaron un modelo conceptual basado en aspectos de la robustez para el análisis de la resiliencia en SUD bajo condiciones de lluvias extremas, empleando la combinación de los conceptos resiliencia y resistencia para la planificación y gestión de estrategias en los sistemas de drenaje. Este modelo consta de tres pasos: i. Definir el sistema de drenaje y los tipos de perturbaciones; ii. Caracterizar los parámetros de comportamiento del sistema de drenaje; y iii. Cuantificar indicadores. En la Figura 6, se presenta el modelo conceptual propuesto por Tahmasebi *et al.*, (2014), para el análisis de la resiliencia en sistemas de drenaje urbano.

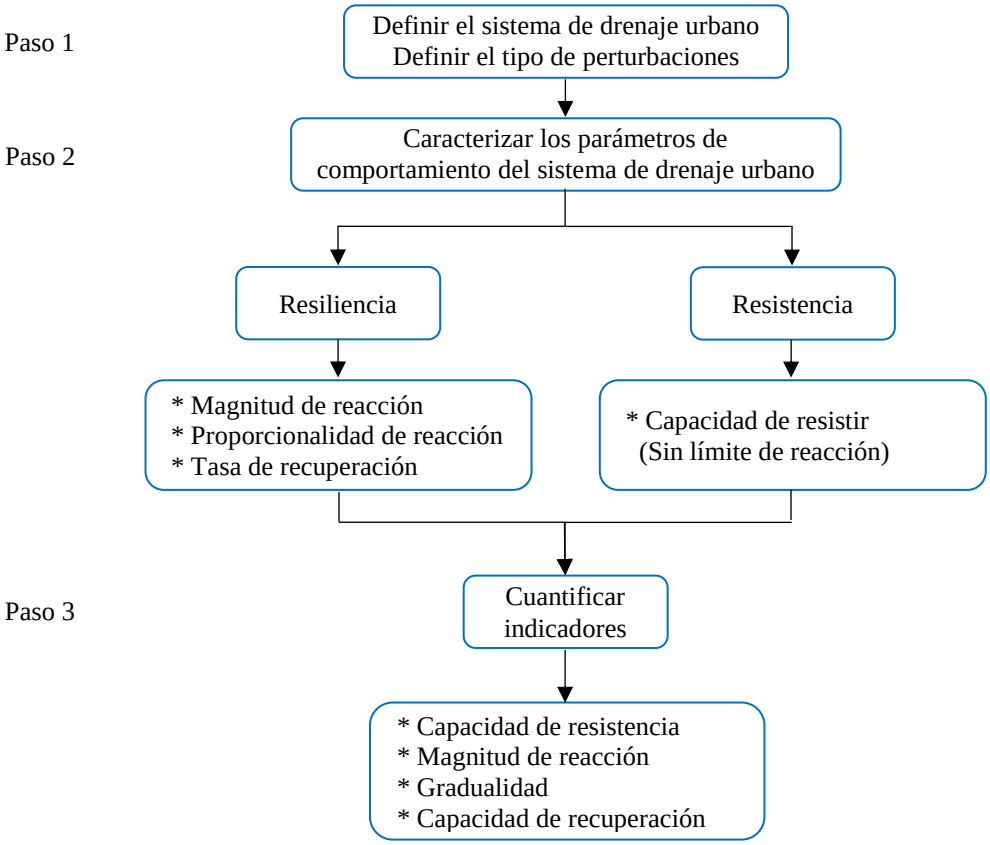


Figura 6 Modelo conceptual para evaluar la resiliencia en SUD
Fuente: Tahmasebi *et al.*, (2014)

Como se observa en la Figura 6, este modelo conceptual hace uso de la resistencia, Walker *et al.*, (2004), definen la resistencia como la facilidad o dificultad de cambiar un sistema y la consideran como una de las características que hacen que un sistema sea estable, por lo cual la reacción de un sistema a una perturbación depende de su capacidad resistencia y resiliencia. Para llegar a la cuantificación de los indicadores se requiere de una serie de ejercicios de modelación del sistema de drenaje empleando hietogramas de precipitación asociados con lluvias de diferentes periodos de retorno y duraciones específicas.

Basados en lo que se denomina el triángulo de la resiliencia (absorción, restauración y adaptación) Francis *et al.,* (2014), desarrollaron un modelo conceptual para la evaluación de la resiliencia en sistemas de ingeniería e infraestructura que consta de cinco componentes: i. Identificación del sistema; ii. Análisis de vulnerabilidad; iii. Establecimiento de objetivos de la resiliencia; iv. Participación de los interesados; y v. Capacidades de la resiliencia. En la Figura 7, se presenta el modelo conceptual propuesto por Francis *et al.*, (2014).

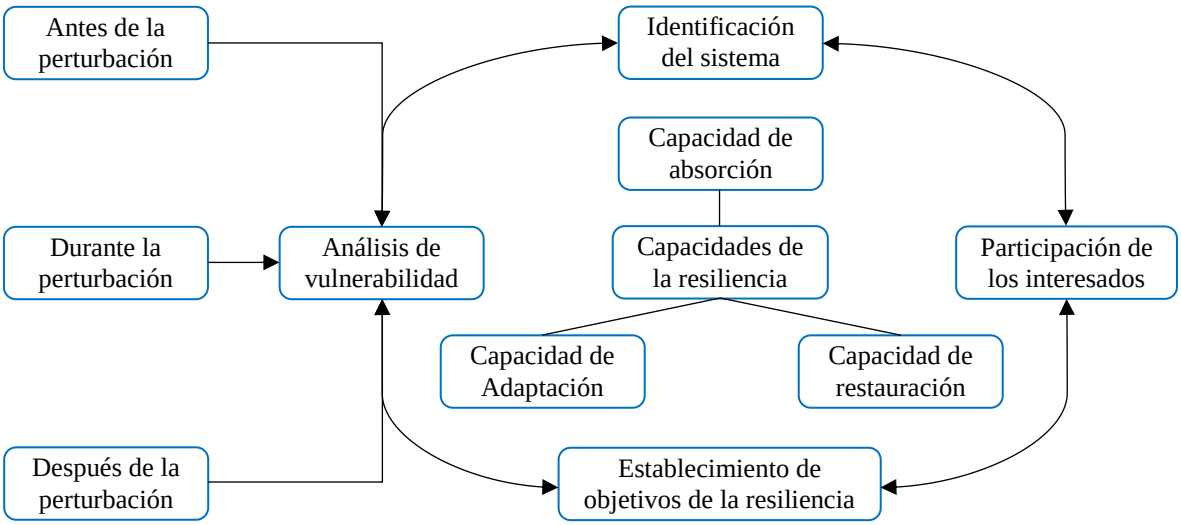


Figura 7 Modelo conceptual para el análisis de la resiliencia en infraestructura
Fuente: Francis *et al.,* (2014)

La identificación del sistema en estudio es un requisito básico para el análisis de la resiliencia que implica la definición del dominio del sistema, sus objetivos fundamentales y la identificación de características físicas, químicas, espaciales o sociales. En el análisis de vulnerabilidad se deben determinar las amenazas que hacen que el estado operativo normal del sistema sea susceptible de interrupción, debido a que la ocurrencia de eventos no puede predecirse perfectamente debido a la incertidumbre, es importante evaluar la vulnerabilidad del sistema ante eventos disruptivos en términos de sus probabilidades (Francis *et al.,* 2014).

El objetivo final de la resiliencia es la continuidad de la función normal del sistema, función que debe definirse de acuerdo con los objetivos fundamentales obtenidos en la identificación del sistema, estos objetivos fundamentales guían a través de los múltiples objetivos existentes en la función normal del sistema. La participación de los interesados es una parte integral del análisis y la gestión de la resiliencia, donde se recomienda la coordinación entre los diferentes niveles de gobierno y los sectores que cuentan con los recursos clave para la recuperación eficiente de los servicios durante una interrupción. Respecto a las capacidades de la resiliencia, mientras que la capacidad de absorción es la capacidad de un sistema para absorber la magnitud de las perturbaciones que se presenten, la capacidad de adaptación es la capacidad de un sistema para adaptarse a situaciones indeseables y la capacidad de restauración se caracteriza por la rapidez de retorno a operaciones aceptables, normales o mejoradas (Francis *et al.*, 2014).

Butler *et al.*, (2014), desarrollaron un modelo conceptual denominado "Safe & SuRe" (Seguro y Sostenible-Resiliente) para mostrar cómo las amenazas emergentes se conectan a través de sus últimas consecuencias con la sociedad, la economía y el medio ambiente, enfatizando en la necesidad y el lugar de las intervenciones. Si bien este es un modelo conceptual que se centra en la resiliencia su estructura es de utilidad para la formulación de modelos conceptuales orientados a la evaluación de los factores que la componen. En la Figura 8, se presenta el modelo conceptual "Safe & SuRe".

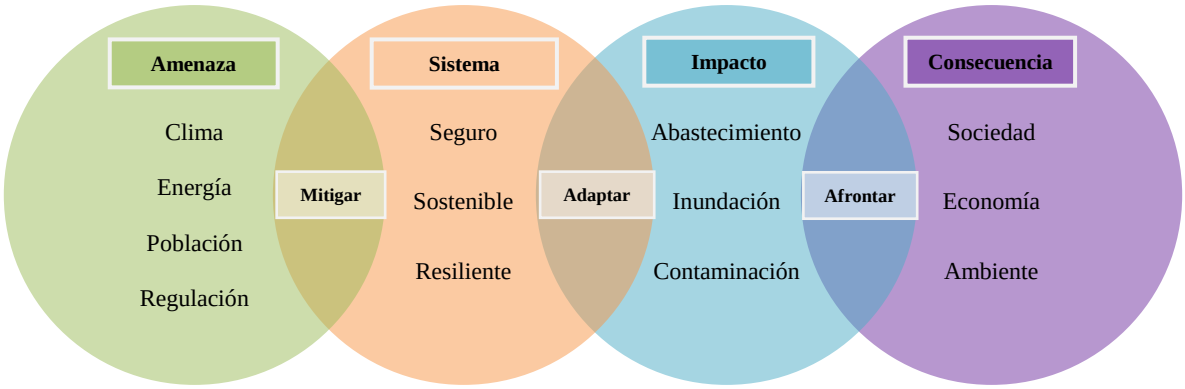


Figura 8 Modelo conceptual para la intervención "Safe & SuRe"
Fuente: Butler *et al.*, (2014)

Teniendo en cuenta que al final de cada periodo evaluado se obtiene un conjunto de consecuencias con información valiosa sobre él sistema. Butler *et al.*, (2016), realizaron una modificación en su modelo conceptual, con el objetivo de utilizar esta información para retroalimentar el sistema, buscando obtener futuras mejoras en el desempeño. Para tener en cuenta este proceso de aprendizaje en el sistema, la estructura del modelo "Safe & SuRe" cambio de lineal a cíclica, modificación útil en la evaluación de escenarios continuos y que garantiza que el sistema se encuentre en un proceso de mejora constante. En la Figura 9, se presenta el modelo conceptual "Safe & SuRe", con la modificación descrita anteriormente.

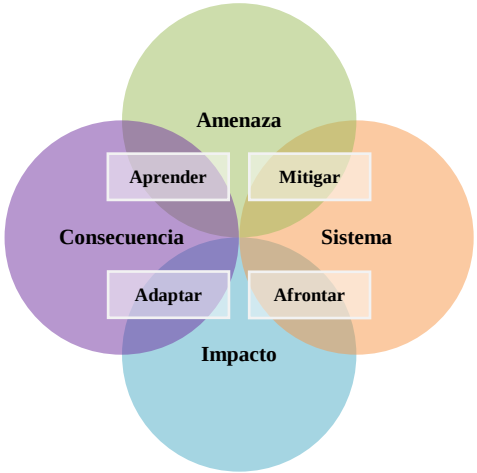


Figura 9 Modelo conceptual para la intervención "Safe & SuRe"
Fuente: Butler *et al.*, (2016)

Modelos conceptuales de estructura más simple que consideran un número mínimo de variables, se han formulado para realizar de manera más práctica la evaluación del desempeño y la resiliencia global de un sistema, como es el caso del modelo desarrollado por Tran *et al.*, (2016), donde no se tienen en cuenta los factores de la resiliencia o sus interacciones, este modelo es útil cuando se cuenta con poca información del sistema y se busca obtener un valor aproximado del desempeño posterior a una perturbación. En la Figura 10, se presenta el modelo propuesto por Tran *et al.*, (2016).

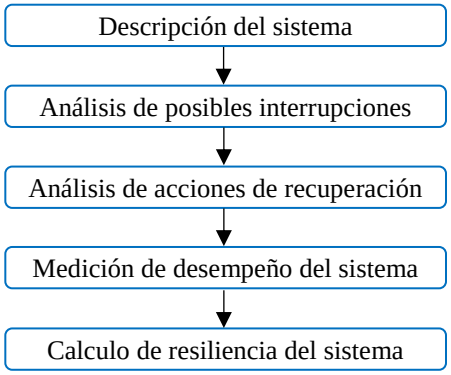


Figura 10 Modelo conceptual para evaluar la resiliencia
Fuente: Tran *et al.*, (2016)

Sin embargo, también se han desarrollado modelos de fácil aplicación para evaluar la resiliencia, donde se tienen en cuenta algunos factores e interacciones debido a la importancia que tienen al momento de construir métricas que permitan identificar de manera específica fallas en el sistema, favoreciendo la selección óptima del tipo de estrategias que deben implementarse para obtener mejoras en el desempeño. En la Figura 11, se presenta el modelo conceptual propuesto por García *et al.*, (2017), para el análisis de la resiliencia.

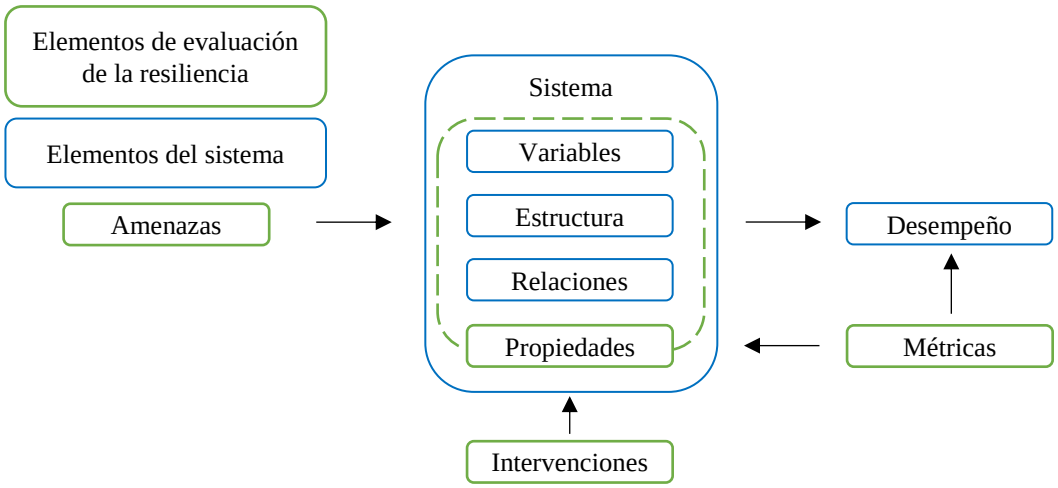


Figura 11 Modelo conceptual para el análisis de la resiliencia
Fuente: García *et al.*, (2017)

Los métodos cuantitativos para evaluar la resiliencia y sus factores en sistemas de agua urbana se han basado principalmente en métricas generales que relacionan el tiempo de falla y la velocidad de recuperación (Ahern, 2011), lo cual se puede representar mediante modelos matemáticos. Actualmente el modelo matemático más utilizado para cuantificar la resiliencia en sistemas de drenaje fue desarrollado por Bruneau *et al.,* (2003), originalmente para estudiar la resiliencia de comunidades ante eventos sísmicos, este modelo tiene sus bases en la curva teórica de desempeño, lo que adicionalmente permite una fácil cuantificación de la severidad, robustez, pérdida y flexibilidad.

En este modelo la resiliencia es representada por el área bajo la curva de una función de desempeño, durante el tiempo que falla el sistema objeto de estudio. Las funciones se pueden expresar en términos de cualquier variable o conjunto de variables que se quieran evaluar en el sistema, para el caso del drenaje urbano esta puede ser una función técnica, económica, ambiental o social, una combinación de estas o todas al tiempo, lo que significa un mayor nivel de complejidad de acuerdo al número de variables que se manejen simultáneamente.

La mayoría de los modelos desarrollados posteriormente conservan la misma estructura, realizando variaciones mínimas en los tiempos de evaluación y las funciones de desempeño, sin embargo, existen modelos matemáticos para cuantificar la resiliencia en otras áreas del conocimiento diferentes al drenaje urbano, infraestructura y desastres naturales que difieren totalmente en estructura y requieren de grandes cantidades información para su correcto funcionamiento. En la Tabla 1, se presenta el modelo propuesto por Bruneau *et al.,* (2003), y algunas de sus derivaciones posteriores.

Tabla 1 Modelos matemáticos para cuantificar la resiliencia y factores base

Ecuación	Variables	Fuente / Área
$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)]\, dt$	t_0: momento inicial de la falla t_1: momento final de la falla $Q(t)$: función de desempeño %	Bruneau *et al.*, (2003) Eventos sísmicos
$L_R = \int_{t_0}^{t_0+t_m} [1 - Q(t)]\, dt$	t_0: periodo de resistencia t_m: periodo de restauración $Q(t)$: función de desempeño	Wang *et al.*, (2009) Sistemas de recursos hídricos
$R = \int_{t_{OE}}^{t_{OE}+T_{LC}} Q(t)/T_{LC}\, dt$	t_{0E}: momento de ocurrencia del evento T_{LC}: tiempo de control del sistema $Q(t)$: función de desempeño %	Cimellaro *et al.*, (2010) Desastres
$R = \frac{\int_{t_0}^{t_1} Q(t)\, dt}{100\ (t_0 - t_1)}$	t_0: momento de ocurrencia de la perturbación t_1: momento de recuperación $Q(t)$: función de desempeño %	Ayyub (2014) Entornos de múltiples riesgos
$R = 1 - Sev_i = 1 - \frac{V_{TF}}{V_{TI}} \times \frac{t_f}{t_n}$	Sev_i: severidad V_{TF}: volumen total de inundación V_{TI}: caudal de entrada al sistema t_f: duración media de inundación t_n: tiempo total transcurrido	Mugume *et al.*, (2015) Sistemas de drenaje urbano
$R = \int_{t_0}^{t_n} (M_o - M_t)\, dt$	t_n: duración total de la perturbación t_0: momento inicial de la falla M_0: estado inicial de la métrica seleccionada M_t: valor de la métrica en el tiempo (t)	García *et al.*, (2017) Aguas residuales urbanas

∗ L_R = loss resilience / pérdida de resiliencia

5.8 Avances en evaluación de la redundancia en sistemas de drenaje urbano

Mugume *et al.*, (2015), son los investigadores pioneros en cuanto a la evaluación del efecto de alternativas redundantes para el aumento de la resiliencia en SUD, entre las cuales proponen la introducción de componentes que proporcionen funciones similares a las que debe brindar el sistema base, por ejemplo, tanques de almacenamiento o tuberías paralelas, para minimizar la propagación de fallas a través del sistema durante condiciones de carga excepcionales. La metodología utilizada por estos investigadores consistió en simular fallas estructurales de manera aleatoria y acumulativa, específicamente el colapso de tramos de tubería, representando problemas de bloqueos y reducción de capacidad hidráulica por sedimentación. En la Figura 12, se presenta el procedimiento del fallo aleatorio acumulativo.

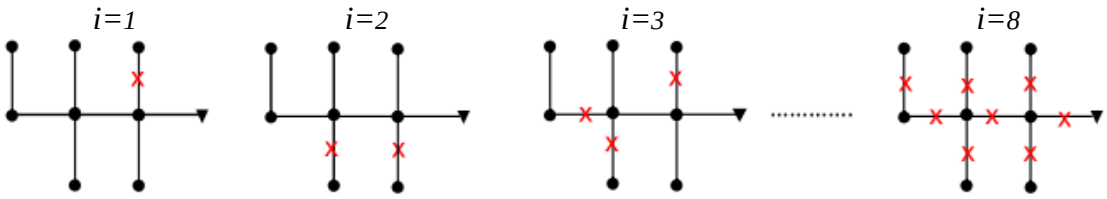
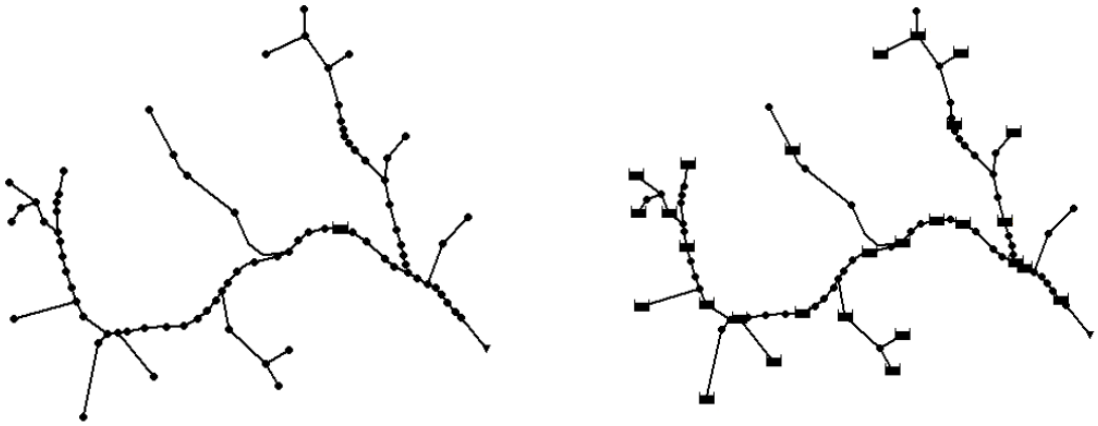


Figura 12 Fallos aleatorios acumulativos en la red de drenaje.
Fuente: adaptado de Mugume *et al.*, (2015).

El tratamiento propuesto para los volúmenes de inundación producto de estas fallas estructurales fueron, inicialmente el uso de un estanque de detención y como segunda alternativa, el uso de tanques distribuidos en la salida de cada subcuenca con un volumen combinado equivalente al de la alternativa inicial. En la Figura 13, se presenta un esquema que representa la distribución del almacenamiento en cada alternativa.



(a) (b)

Figura 13 Red de drenaje urbano (a) estanque de detención centralizado (b) tanques descentralizados. Fuente: adaptado de (Mugume and Butler, 2015).

Esta metodología fue aplicada en el SUD de la cuenca Nakivubo, una parte altamente urbanizada de la ciudad de Kampala, Uganda. El modelo hidráulico del sistema se encontraba constituido por 81 enlaces, 81 nodos y 1 emisario, para una longitud total de conductos de 22,782 m. El sistema modelado drenaba un área total de 2,793 ha divididas en 31 subcuencas y presentaba un volumen de inundación total de 706,045 m^3. Los resultados obtenidos para una redundancia del 44 % en la alternativa de almacenamiento centralizado con un estanque de detención de 315,000 m^3 fueron una reducción del volumen de inundación del 3.4 % y un aumento del 1.1 % en la duración promedio de la inundación. Por otro lado, la alternativa con tanques descentralizados obtuvo una reducción del volumen de inundación del 32 % y una reducción del 27 % en la duración promedio de la inundación.

Mugume *et al.,* (2015b), también aplicaron esta metodología para un sistema de drenaje simplificado de 25 enlaces y 26 nodos. El sistema modelado drenaba un área total de 22.5 ha y presentaba un volumen de inundación total de 10,910 m^3. En la Figura 14, se presenta un esquema que representa la red de drenaje en su estado original y la distribución del almacenamiento en cada alternativa.

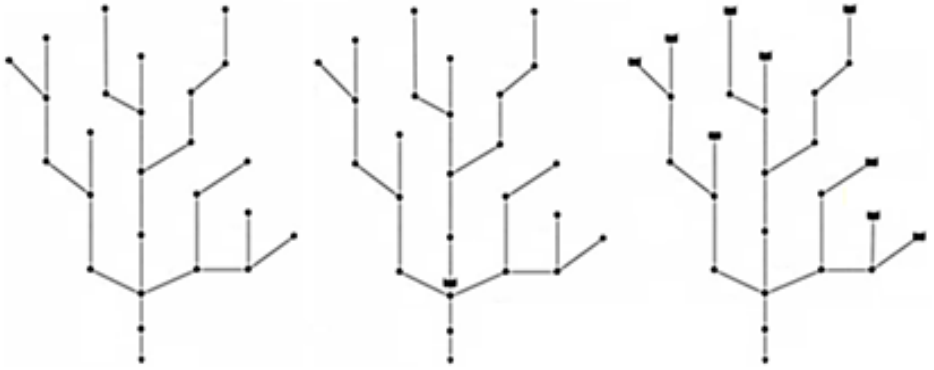


Figura 14 Red de drenaje urbano simplificada (a) diseño original (b) tanque centralizado (c) tanques descentralizados. Fuente: adaptado de Mugume *et al.,* (2015b).

Los resultados obtenidos en la alternativa de almacenamiento centralizado fueron una reducción del volumen de inundación del 4.8 % y un aumento del 1.9 % en la duración promedio de la inundación. Por otro lado, la alternativa con tanques descentralizados cuyo objetivo era contener la escorrentía, evitando rápidas concentraciones en los colectores obtuvo una reducción del volumen de inundación del 50 % y una reducción del 46 % en la duración promedio de la inundación.

En ambos casos de estudio las simulaciones se llevaron a cabo en un entorno Matlab vinculado al modelo de gestión de aguas pluviales SWMM v5.1 para investigar el efecto del fallo acumulativo de la tubería en la pérdida de funcionalidad resultante y para cuantificar el rendimiento de los sistemas de drenaje en cada nivel de falla, utilizando el volumen de inundación total y la duración media de inundación nodal como indicadores de rendimiento del sistema.

6 METODOLOGÍA

6.1 Identificación de factores clave para la evaluación de la redundancia

Para identificar los factores clave en la evaluación de la redundancia en la gestión de la resiliencia en SUD, se empleó la metodología de gestión de información de temas científicos propuesta por Gómez *et al.*, (2014), la cual puede ser aplicada a cualquier tema de investigación para determinar la relevancia e importancia del mismo y asegurar la originalidad sobre la revisión. Esta metodología se compone de cuatro fases: i. Definición del tema de investigación; ii. Búsqueda de la información; iii. Organización de la información; y iv. Análisis de la información.

Para la búsqueda de información se utilizaron las bases de datos Scopus, Science Direct, Springer, SciELO empleando las palabras clave: "redundancia", "resiliencia" y "drenaje urbano", además de palabras clave de importantes problemáticas relacionadas con los sistemas de drenaje como: "inundación" y "cambio climático". Las ecuaciones de búsqueda empleadas fueron: "Redundancy AND Resilience", "Redundancy AND Urban Drainage", "Redundancy AND Climate Change", "Redundancy AND Flood", "Resilience AND Urban Drainage" y "Resilience AND Flood". Estas búsquedas se realizaron sin límites de fecha, obteniendo un periodo de observación desde 1973 hasta 2018.

Para organizar los 501 documentos que fueron encontrados, inicialmente se utilizó el software Mendeley para clasificar la información por título, autor, año y revista, posteriormente se aplicaron criterios de selectividad con el fin de identificar los documentos más relevantes, para lo cual se empleó el software de minería de datos RefViz, el cual utiliza algoritmos matemáticos para agrupar la documentación suministrada en función de la frecuencia de aparición de las palabras clave; esto permite ver todo el universo de búsqueda clasificado en áreas temáticas, dentro de un mapa de ideas que el software denomina Galaxia.

Con la información organizada se procedió con el análisis, donde se identificaron 24 grupos temáticos de los cuales 22 presentaban un numero bajo de artículos, por lo que se tomó la decisión de revisar los resúmenes y conclusiones de los artículos correspondientes a estos 22 grupos, indagando sobre cuáles eran los documentos más útiles para la temática en estudio; para los 2 grupos restantes conformados por 313 documentos, se procedió con la aplicación de filtros por medio de las palabras clave, donde se excluyeron las publicaciones que se encuentran en áreas del conocimiento no relacionadas con los SUD; una vez realizado este segundo filtro, se continuo con la revisión de los resúmenes y conclusiones para una total de 227 documentos parcialmente revisados.

La revisión de los resúmenes y conclusiones permitió identificar 73 documentos posiblemente relevantes, los cuales fueron revisados por completo con el fin de decidir si la información que contenían estaba o no relacionada con el objetivo de la búsqueda, identificando así 26 documentos como principales. Una vez identificados los documentos principales, se realizó un análisis de referencias bibliográficas para identificar los autores con más citaciones, con el fin de rescatar otros estudios potencialmente incluibles para la revisión.

En la Figura 15, se presentan los grupos de interés en las temáticas consultadas de acuerdo con la metodología anteriormente descrita.

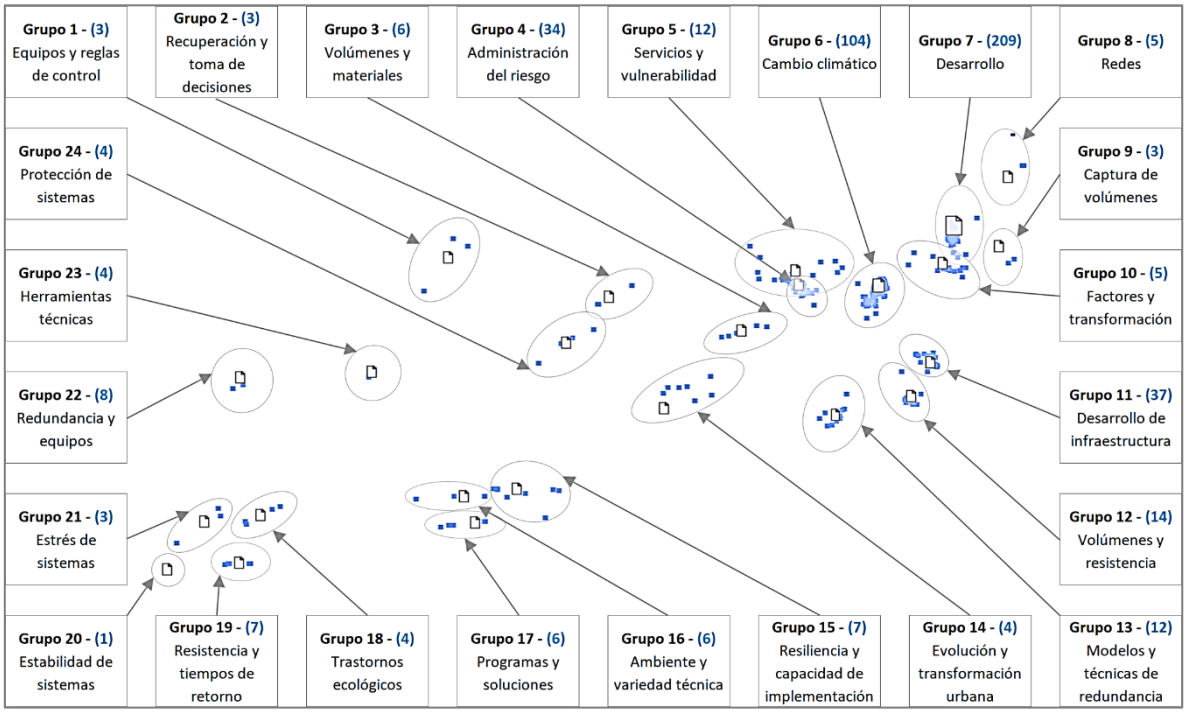


Figura 15 Organización sistemática de la documentación en mapa de ideas - Galaxia

El análisis de la frecuencia de citaciones permitió identificar 5 documentos adicionales que fueron incluidos en la revisión por considerarse relevantes para el tema objetivo, al potenciar el reconocimiento de ideas principales, inferencias, conceptos claves, etc., para un total de 31 documentos seleccionados. En esta etapa de la metodología se observa un avance significativo, ya que de los 501 documentos iniciales se tienen 31 identificados como de mayor interés (primarios), concentrando así la lectura sobre un menor número de artículos, con los cuales se realizó un análisis y comparación de la aplicación del concepto de redundancia identificando elementos comunes y relevantes para su evaluación en SUD, con lo cual se constituyó la base del estudio sobre los factores clave para la evaluación de la redundancia en la gestión de la resiliencia en SUD.

La información recolectada finalmente se utilizó para incluir la redundancia como factor de la resiliencia en el proceso de evaluación de resiliencia establecido actualmente, el cual se basa en una curva teórica de desempeño, esto con el fin de analizar la cabida conceptual del factor, sus efectos sobre los factores existentes e intentar establecer relaciones de dependencia con los factores ya incluidos, buscando que las variaciones ocasionadas tras la inclusión de la redundancia, permitieran identificar cuáles eran los factores relevantes para su evaluación.

6.2 Desarrollo de modelo conceptual para evaluación de la redundancia

En el planteamiento del modelo conceptual para evaluar la redundancia en la gestión de la resiliencia en SUD, se empleó la metodología de gestión de información de temas científicos propuesta por Gómez *et al.,* (2014), con el propósito de identificar modelos conceptuales desarrollados alrededor de la redundancia u otro factor de la resiliencia en diversas áreas del conocimiento y así obtener elementos que permitieran elaborar el modelo conceptual para su evaluación. Para la búsqueda de información se utilizaron las bases de datos Scopus, Science Direct, Springer, SciELO empleando las palabras clave: "redundancia", "resiliencia", "modelo conceptual", "modelo de dominio" y "marco conceptual". Las ecuaciones de búsqueda empleadas fueron: "Redundancy AND conceptual model", "Redundancy AND domain model", "Redundancy AND conceptual framework", "Resilience AND conceptual model", "Resilience AND domain model" y "Resilience AND conceptual framework".

Para organizar los 133 documentos que fueron encontrados, inicialmente se utilizó el software Mendeley para clasificar la información por título, autor, año y revista, con la información organizada se procedió con la revisión resúmenes y conclusiones, indagando sobre cuáles eran los documentos más útiles para el planteamiento del modelo, de la revisión de resúmenes y conclusiones se obtuvieron 27 documentos posiblemente relevantes, los cuales fueron revisados por completo para decidir si la información que contenían estaba o no relacionada con el objetivo de la búsqueda, identificando 11 documentos como principales. Posteriormente, se realizó un análisis de referencias bibliográficas para identificar los autores con más citaciones, con el fin de rescatar otros estudios potencialmente incluibles para la revisión.

El análisis de la frecuencia de citaciones permitió identificar 2 documentos adicionales que fueron incluidos en la revisión por considerar que potenciaban el reconocimiento de ideas principales, inferencias y conceptos claves, para un total de 13 documentos seleccionados, con los cuales se realizó un análisis de los modelos conceptuales desarrollados, identificando elementos conceptuales, con los cuales se constituyó la base del estudio para la elaboración del modelo conceptual para la evaluación de la redundancia en SUD.

La información recolectada finalmente se clasifico en diferentes bloques temáticos dentro de los cuales se identificaron dependencias globales, que dieron origen a un primer modelo conceptual general. La información contenida en cada bloque fue discriminada buscando obtener subdivisiones más específicas que dieron origen a los pasos macro para realizar la evaluación de la redundancia, mientras los conceptos contenidos en cada subdivisión fueron organizados de acuerdo a sus relaciones directas, permitiendo desarrollar una secuencia lógica y detallada para realizar la evaluación, secuencia que hace uso de la curva teórica de desempeño como herramienta de operativización del modelo.

6.3 Descripción de la zona de estudio

El sistema de drenaje de la cuenca de río Lili hace parte del sistema de drenaje sur el cual se localiza al suroccidente de la ciudad de Cali en la cuenca alta del río Cauca, flanco oriental de la cordillera occidental entre las coordenadas Planas de Gauss, origen Colombia Oeste, Norte (m) 861.150, 878.100 y Este (m) 1.045.300, 1.068.450. También conformado por las cuencas de los ríos Meléndez, Cañaveralejo y el Canal Ferrocarril, presenta un área aproximada de 12,089 ha (Barahona, 2018).

El río Lili nace en el sector de Villa Carmelo, antes de la zona protegida del Parque Natural Farallones, a 1785 m de altura, su cuenca tiene un área aferente de 3,688.3 ha y desemboca en el Canal Interceptor Sur, luego de recorrer aproximadamente 6.9 Km, cruzando la ciudad en el sentido Oeste – Este. Limita por el suroccidente con la cuenca del río Pance, por el norte con la cuenca hidrográfica del río Meléndez y por el oriente con el Canal Interceptor Sur (DAGMA, 2010). En la Figura 16, se presenta la localización de cuenca del río Lili.

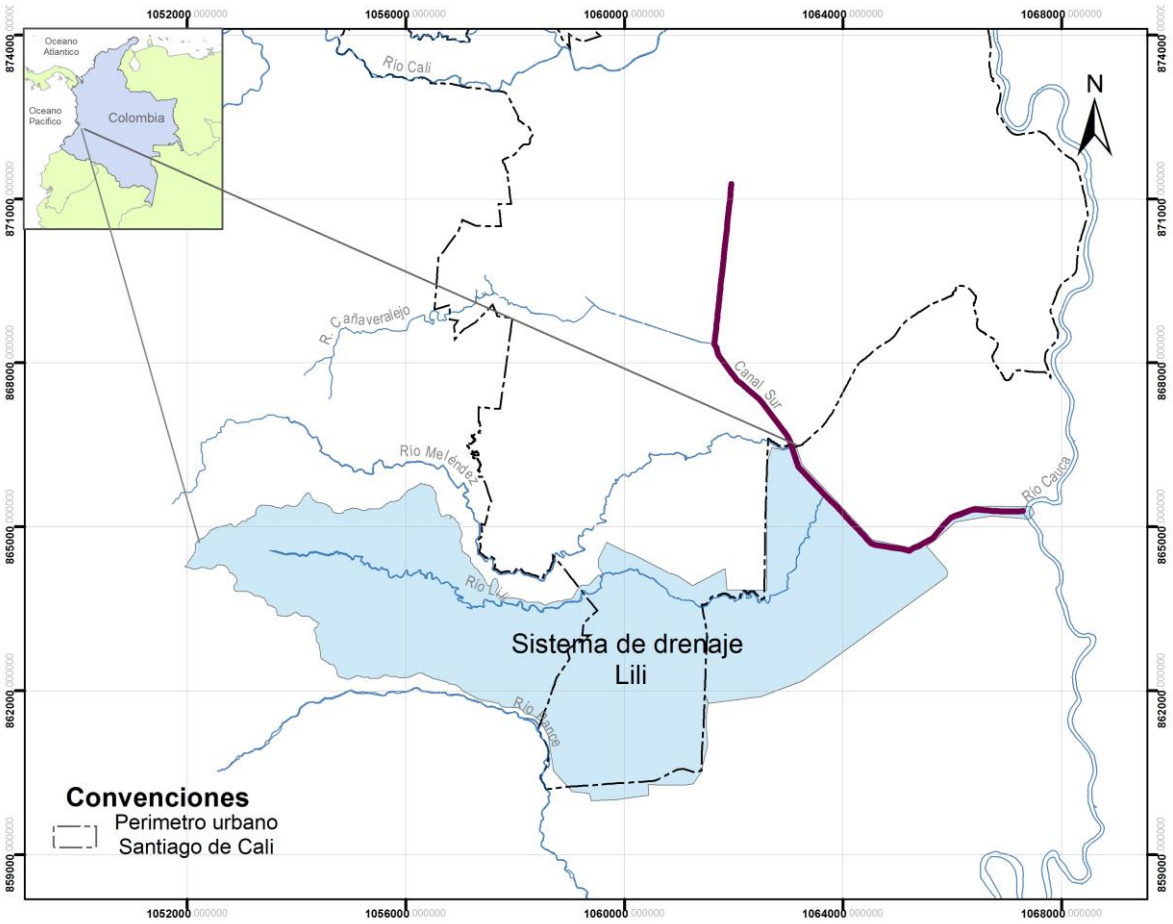


Figura 16 Ubicación sistema de drenaje Lili

6.3.1 Hidrología

6.3.1.1 Estaciones meteorológicas

La red meteorológica en el sistema de drenaje Lili cuenta con la información de las estaciones pluviográficas; La Ladrillera (en funcionamiento desde 1982 hasta 2011), La Riverita y El Boquerón. Los eventos de lluvia en la cuenca presentan un ciclo bimodal con dos temporadas lluviosas (abril-mayo y octubre-noviembre) y dos temporadas secas (diciembre-febrero y junio-agosto) (POMCA-LMC, 2016). La Figura 17, presenta la localización de las estaciones mencionadas anteriormente.

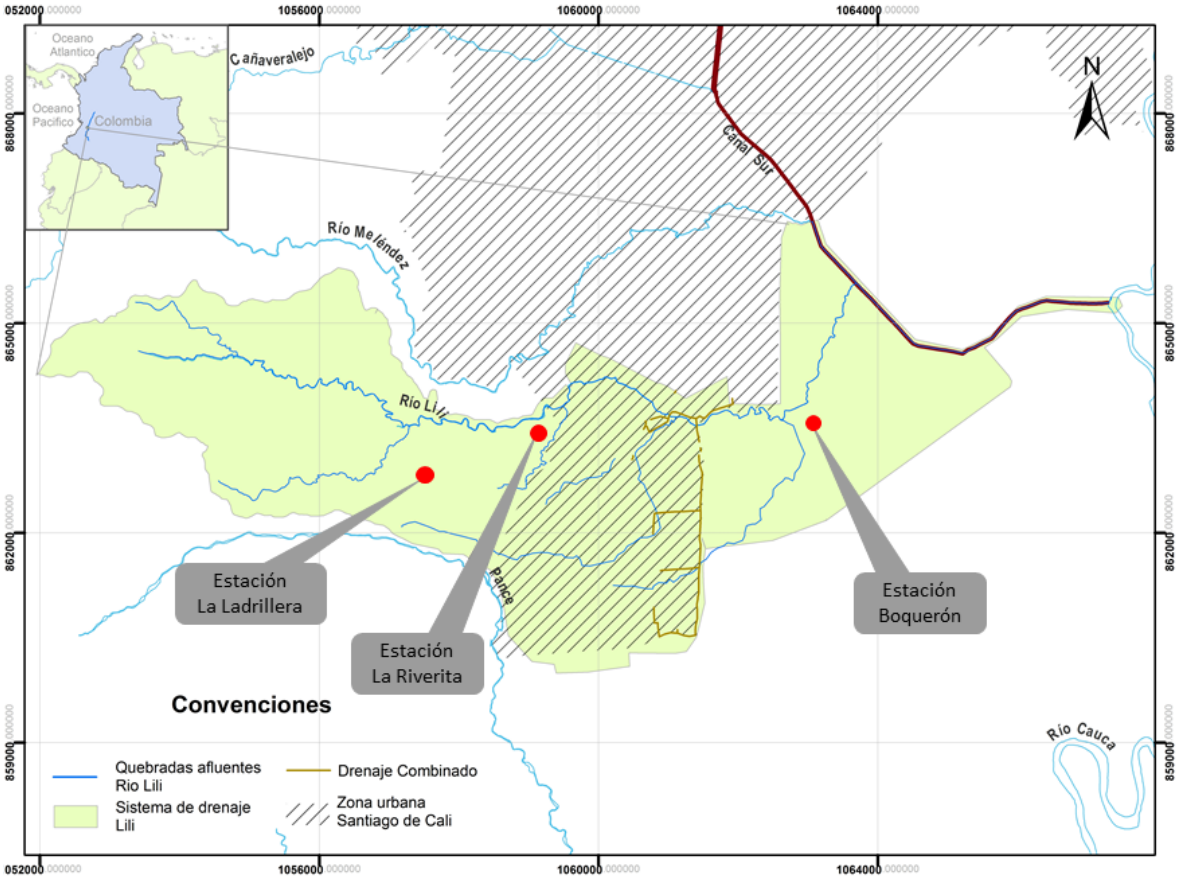


Figura 17 Estaciones meteorológicas asociadas al sistema de drenaje del río Lili

6.3.1.2 Curvas IDF

Las curvas IDF son una herramienta para el cálculo del diseño urbano en cuanto a la intensidad, duración y frecuencia de las lluvias y la magnitud del caudal de escorrentía. Estas curvas corresponden al análisis estadístico de registros existentes en las estaciones meteorológicas las cuales poseen una forma descrita mediante la Ecuación 1.

$$i = C * \frac{Tr^A}{(t+B)^N} \qquad \textit{Ecuación 1}$$

Dónde:

i: duración de la lluvia intensidad de la lluvia (mm/hr)
C, A, B, N: parámetros constantes
Tr^A: tiempo de retorno en años
t: tiempo de duración de la lluvia

Los parámetros de la ecuación de las curvas IDF de las estaciones Boquerón y La Riverita no se poseen, dada la insuficiencia en la cantidad de datos para la generación de las curvas de frecuencia. Los parámetros de la ecuación de las curvas IDF asociados a la estación Ladrillera, para asociarlos a la cuenca alta del río Lili se adoptan según el trabajo realizado por Duque (2010). La estación meteorológica que se asocia a la cuenca baja del río Lili, es la estación Univalle (esta se asocia por cercanía geográfica). En Tabla 2 se presenta Los parámetros de las ecuaciones de las curvas IDF de la estación ladrillera y Univalle.

Tabla 2 Parámetros de las curvas IDF

Estaciones meteorológicas	Parámetros de las curvas IDF				
	C	A	B	N	Fuente
La Ladrillera	783.780	0.179	19.5552	0.7188	Duque, (2010)
Univalle	1475.933	0.067	13.530	0.805	García, (2017)

6.3.1.3 Hietogramas asociados a periodos de retorno

Los hietogramas asociados a periodos de retorno para implementar el modelo SWMM sobre el sistema de drenaje del río Lili se sintetizaron usando el método de bloques alternos de Chow (1994) y las curvas IDF de la estación la Ladrillera y Univalle. Se crearon hietogramas sintéticos asociados a periodos de retorno de 2, 5 y 10 años con una duración de 60 (min). La Figura 18, presenta los hietogramas asociados a cada periodo de retorno en la parte alta y baja.

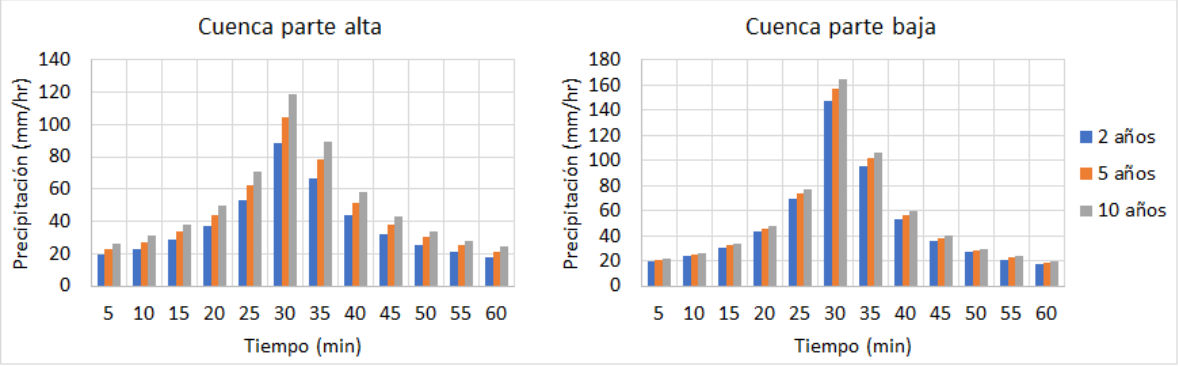


Figura 18 Hietogramas para tiempos los tiempos de retorno 2, 5 y 10 años

6.3.1.4 Esquematización del sistema de drenaje de la cuenca del río Lili

La modelación hidrodinámica del Sistema de drenaje de la cuenca del río Lili se implementó mediante el modelo determinístico SWMM v5.1. La discretización espacial del sistema de drenaje sur se realizó usando sistemas de información geográfica (SIG). Se cruzaron capas de datos SIG con información sobre la clasificación de actividades por zonas, coberturas de usos del suelo y el modelo de elevación digital de la cuenca.

La información sobre la infraestructura del alcantarillado se obtuvo del catastro de redes de alcantarillado separado y combinado de EMCALI (2016), el catastro de redes corresponde a dos archivos en formato ESRI Shapefile, mediante herramientas GIS se estimaron los parámetros preliminares del modelo como ancho de la cuenca, porcentaje de área impermeable y pendiente de la cuenca, los parámetros de rugosidad se establecieron según lo recomendado en el manual de SWMM v5.1.

El modelo de infiltración usado fue el modelo de Horton. Los parámetros de infiltración fueron estimados a partir de la microzonificación geotécnica realizada por INGEOMINAS y DAGMA (2005). La zonificación sísmica permitió estimar el tipo de suelo en las subáreas esquematizadas. Según el tipo de suelo en cada subárea se asignaron los parámetros de infiltración. En la Figura 19, se presenta la esquematización en SWMM del sistema de drenaje de la cuenca del río Lili.

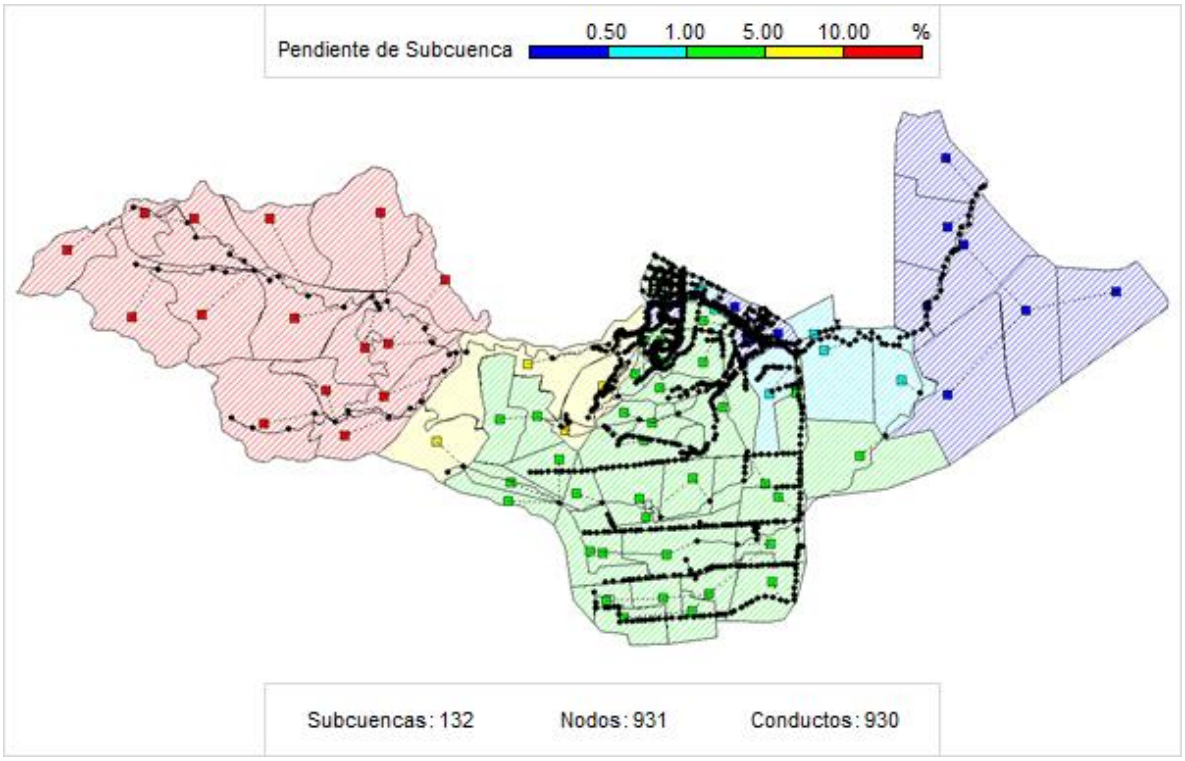


Figura 19 Esquematización de la cuenca del río Lili en SWMM

6.4 Definición de la función de desempeño

Teniendo en cuenta que la amenaza que se decidió evaluar en el sistema fue la inundación producto eventos de precipitación con intensidades que exceden la capacidad de la infraestructura instalada, la función de desempeño se expresó en términos de los volúmenes que determinan el funcionamiento del sistema. En la Figura 20, se presentan las interacciones básicas de estos volúmenes en un sistema de drenaje para un evento de precipitación.

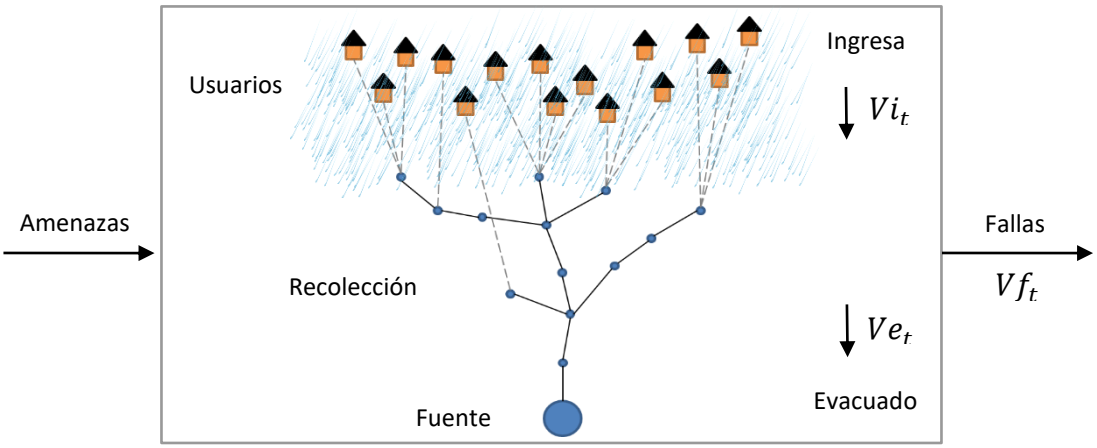


Figura 20 Interacciones básicas en un sistema de drenaje para un evento de precipitación
Fuente: adaptado de Ji *et al.*, (2016)

Donde Vi_t es el volumen que ingresa al sistema, Ve_t es el volumen que evacua el sistema y Vf_t representa el volumen de inundación cuando la capacidad de evacuación del sistema es insuficiente. Realizando un balance general de volúmenes para un evento en el sistema se obtuvo:

$$Vi_t = Ve_t + Vf_t \qquad \textit{Ecuación 2}$$

Tras despejar el volumen que ingresa al sistema se obtuvo la siguiente ecuación:

$$1 = \frac{Ve_t}{Vi_t} + \frac{Vf_t}{Vi_t} \qquad \textit{Ecuación 3}$$

Por lo cual, el desempeño del sistema en términos de cantidad (volumen), puede ser representado por cualquiera de los siguientes términos como función de desempeño:

$$\textit{Desempeño}_t = \frac{Ve_t}{Vi_t} \;;\; \textit{Desempeño}_t = 1 - \frac{Vf_t}{Vi_t} \qquad \textit{Ecuación 4}$$

Sin embargo, la selección de uno de estos términos, depende de la facilidad para obtener dicha información, razón por la cual en este caso fue seleccionado el segundo término.

6.5 Automatización para la aplicación de la curva teórica de desempeño

Debido a las múltiples fallas que se pueden presentar en los sistemas de drenaje y la creciente oferta de SUDS, basados en transporte, infiltración, almacenamiento y sus combinaciones, las posibilidades de encontrar el escenario en el cual se obtengan los resultados más favorables puede ser un proceso complejo, producto del número de posibles escenarios para probar un determinado número fallas con un determinado número de alternativas. Por esta razón es conveniente automatizar la generación y ejecución de escenarios y así no limitar el número de simulaciones cuyos resultados se quisieran conocer para tomar una decisión, para esta actividad se utilizó la herramienta de código abierto desarrollada por (Riaño, 2016) denominada MatSWMM, la cual es un toolbox de código abierto en Matlab, que permite ejecutar archivos del modelo "Storm Water Management Model" SWMM y extraer los resultados de la simulación de manera organizada para su análisis.

Para la aplicación de la curva teórica de desempeño se desarrolló un grupo de funciones en Matlab, cuya función fue utilizar los resultados de la ejecución del escenario de amenaza en MatSWMM, para cuantificar los volúmenes que se generaban en cada subcuenca durante el evento de precipitación y para localizar, cuantificar y listar, los nodos que presentaron fallas con sus correspondientes volúmenes y duración de inundación, obteniendo así los valores de Vi_t y Vf_t, con los cuales se construyó la curva de desempeño del escenario de amenaza y se cuantificaron la resistencia, pérdida, propagación, recuperación y flexibilidad inicial.

La información anterior se utilizó para la generación de escenarios basados en una redundancia equivalente al volumen de inundación en el nodo crítico y sus posibilidades de distribución de manera descendente entre los demás nodos afectados, inicialmente dándole prioridad a la magnitud de las fallas y finalmente dándole prioridad a su duración. Cada uno de los escenarios generados fue ejecutado con MatSWMM y procesado automáticamente con el grupo de funciones desarrolladas para obtener sus valores de Vi_t y Vf_t, generando un conjunto de curvas de desempeño y valores de resistencia, pérdida, propagación, recuperación y flexibilidad, que sirvieron como descriptores del comportamiento de la redundancia. En la Figura 21, se presentan los elementos de la Toolbox MatSWMM, mientras en la Figura 22, se presenta un resumen de los procesos que se realizaron con el conjunto de funciones desarrolladas las cuales se presentan en detalle en el Anexo 1.

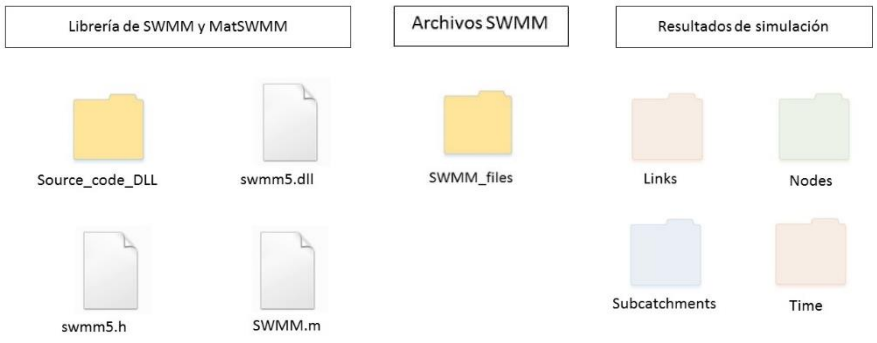


Figura 21 Carpetas y archivos correspondientes al Toolbox MatSWMM.

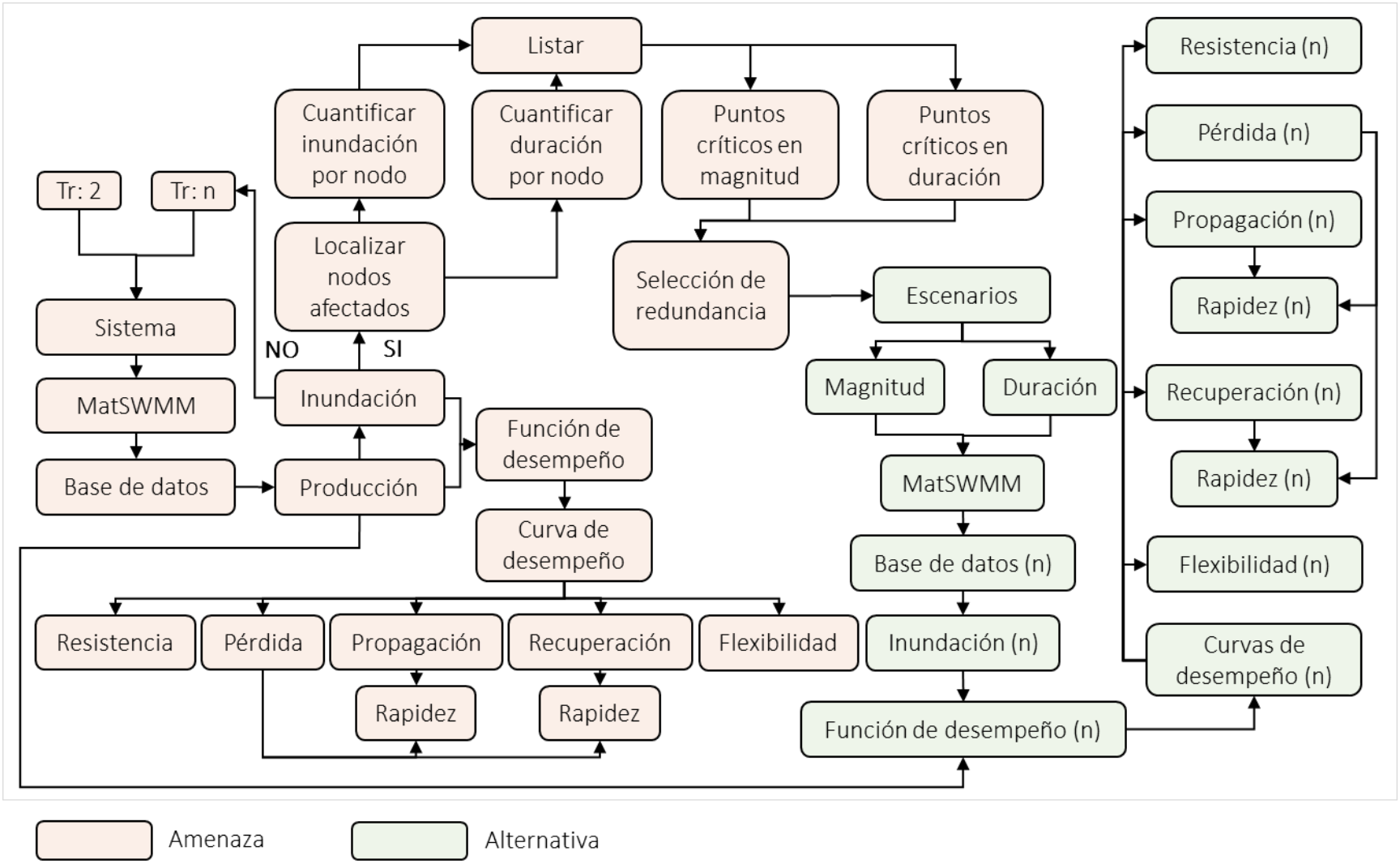


Figura 22 Procesos del grupo de funciones desarrolladas en Matlab

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Factores clave para la evaluación de la redundancia

La metodología desarrollada por Mugume *et al.*, (2015), (ver sección 5.8) la cual es utilizada para probar alternativas redundantes en sistemas de drenaje con problemas de inundación debido a fallas funcionales y/o estructurales, se basa en la cuantificación de la resiliencia para describir el efecto de la inclusión de dichas alternativas, sin embargo, de acuerdo con la curva teórica de desempeño y el concepto de redundancia, la severidad fue considerada como un mejor indicador para evaluar el efecto de alternativas redundantes en la nueva metodología.

Adicionalmente la selección de la severidad como el indicador ideal para la evaluación de la redundancia se soporta en que la redundancia tiene como variable asociada la capacidad de absorción (Balsells *et al.*, 2013), y dado que se espera que con la implementación de alternativas redundantes se consiga la disminución de la magnitud y duración de las fallas que se presenten en el sistema, dicha capacidad de absorción solo tiene efecto sobre aquello que se quiere evitar en el sistema, lo cual está representado por la severidad. La Figura 23, muestra una representación teórica del efecto de incluir alternativas redundantes en un sistema.

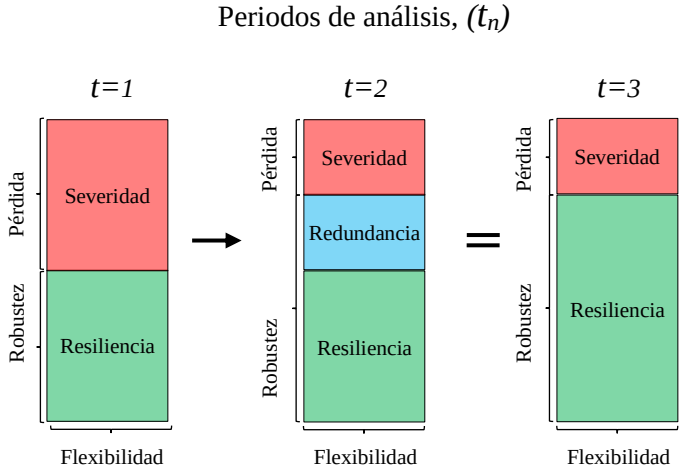


Figura 23 Proceso de evaluación para alternativas redundantes

De acuerdo con la Figura 23, incluir el factor redundancia ocasiona variaciones sobre todos los factores base, la pérdida, la robustez y la flexibilidad, por lo tanto también se ven afectadas la severidad y resiliencia del sistema, los cambios que se producen en este conjunto de factores fueron determinantes para la identificar formas de evaluar la redundancia, sin embargo, esto no significa que todos los factores que se ven alterados por la inclusión de la redundancia sean claves para su evaluación. En la Tabla 3, se describe el efecto que tiene la inclusión o aumento de la redundancia sobre los factores base, la severidad y la resiliencia.

Tabla 3 Efecto de la inclusión de la redundancia como factor de la resiliencia

Factor de la curva teórica de desempeño	Efecto del aumento de la redundancia sobre el factor
Pérdida	Disminución, debido a que la capacidad de absorción afecta positivamente el pico máximo de la perturbación, consiguiendo según sea la magnitud de la perturbación prevenir o disminuir la falla.
Robustez	Aumento, debido a que, al afectar positivamente el pico máximo de la perturbación, se consigue la ampliación de la capacidad residual, haciendo que el sistema soporte mayor carga antes de colapsar.
Flexibilidad	Disminución, debido a que a menores picos de perturbación y mayor capacidad residual se obtienen menores tiempos de falla producto de la reducción en los periodos de propagación y recuperación.
Severidad	Disminución, debido a que la capacidad de absorción no hace efecto solo en el instante especifico de tiempo donde se presenta la máxima pérdida, también lo hace durante toda la perturbación.
Resiliencia	Aumento, debido a que cada unidad de severidad absorbida por la redundancia pasa posteriormente a ser parte de la resiliencia, con lo cual se consigue que el sistema sea más resiliente respecto a su estado inicial.

Como se observa en la Tabla 3, para incluir la redundancia en la curva teórica de desempeño se requiere conocer las funciones que desempeñan los factores ya establecidos y sus interacciones, debido a que con esta información es posible predecir el comportamiento del sistema cuando se realizan modificaciones en su configuración. En la Figura 24, se presentan las relaciones de dependencia que se dan entre los factores ya establecidos, los cuales fueron clasificados de acuerdo a la forma en la que son representados gráficamente en la curva teórica de desempeño.

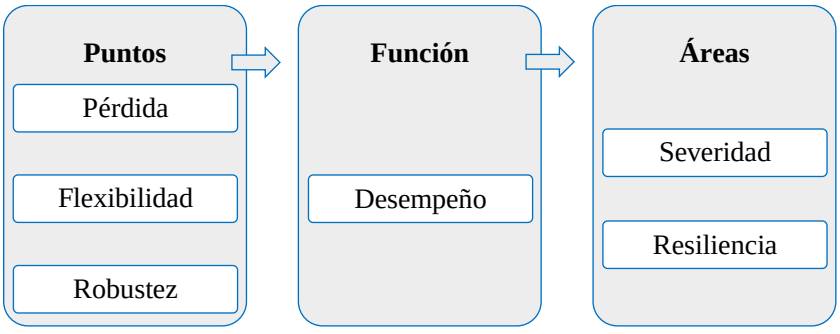


Figura 24 Relaciones entre los factores de la curva teórica de desempeño

Una característica importante de esta clasificación es que cada uno de los tres bloques cuenta con la información suficiente para recrear la curva teórica de desempeño por completo, por lo que si se incluyen nuevos factores esto debe representar la disminución de unos y el crecimiento de otros para mantener el equilibrio. La detección de estas variaciones en los factores que se dan al incluir nuevos elementos en el sistema son el principal insumo para el desarrollo de la nueva metodología.

A diferencia de los factores base de la resiliencia, la redundancia requiere de mínimo un segundo escenario que incluya las alternativas redundantes para poder ser calculada, como se presenta a continuación en la Figura 25.

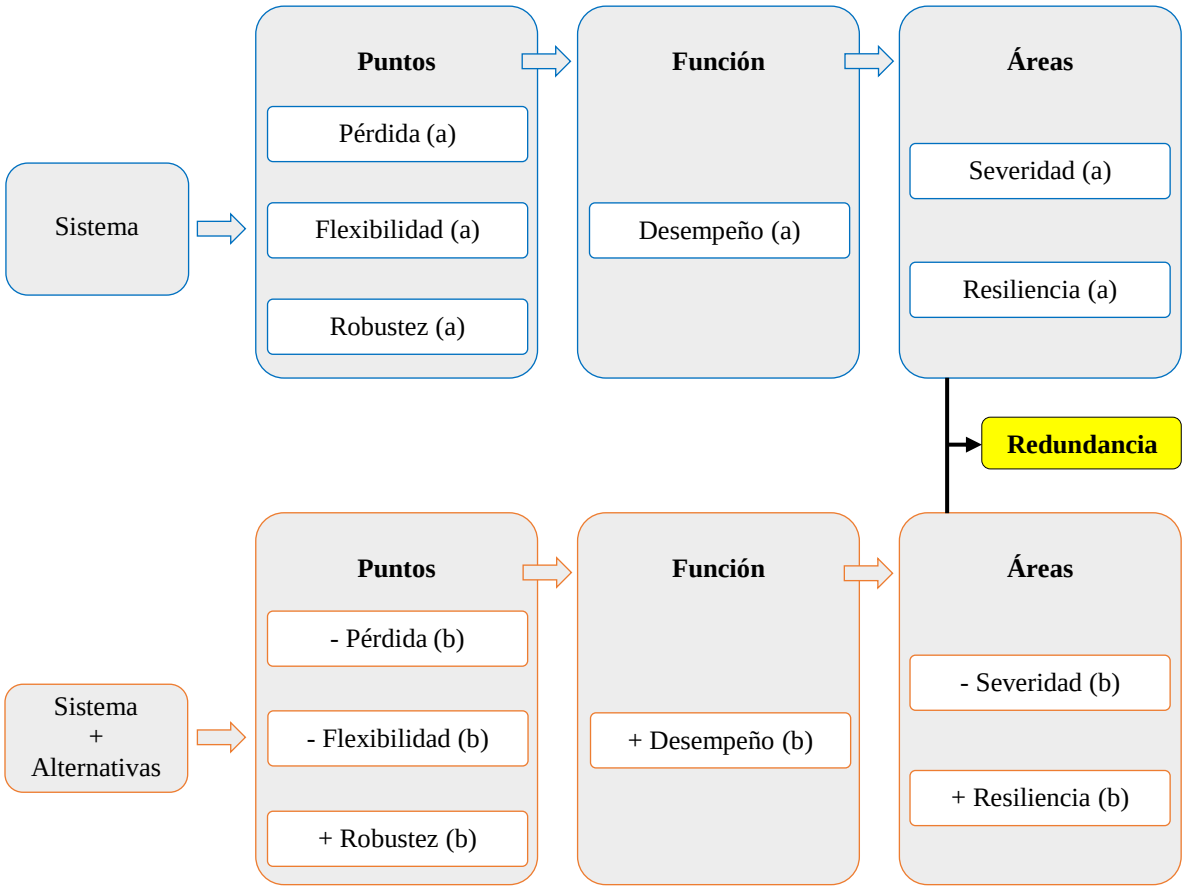
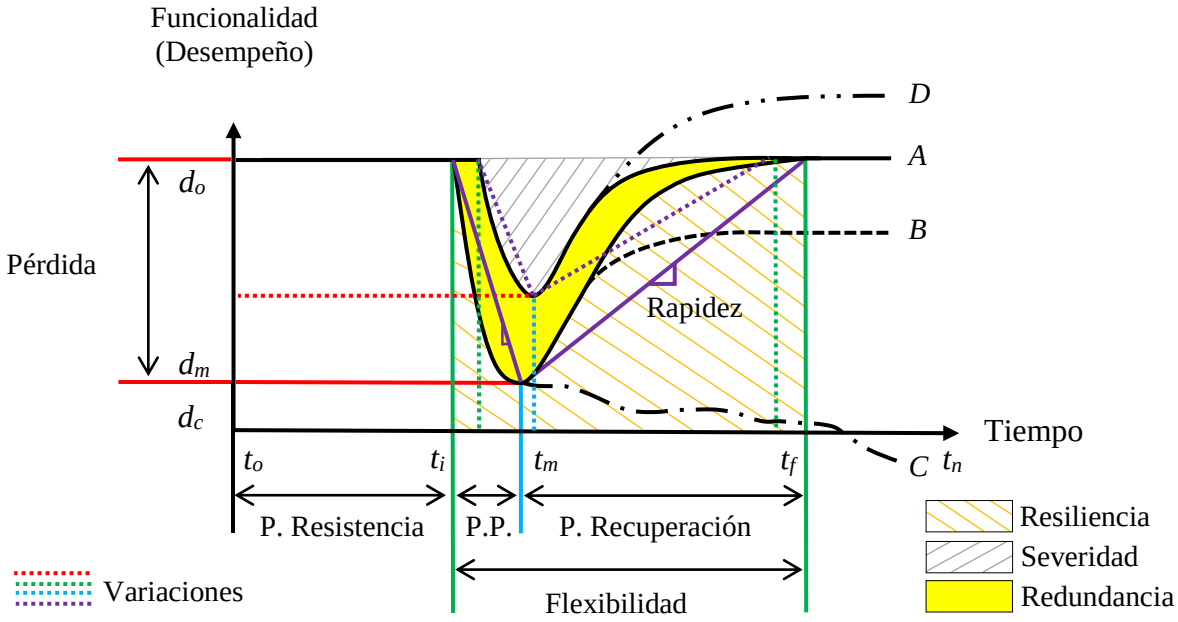


Figura 25 Condiciones para la evaluación de la redundancia

Debido a que la redundancia se origina por cambios en la severidad se puede afirmar que este es un factor compuesto y dada su capacidad de absorción sobre la severidad mientras fortalece a la resiliencia su clasificación tiene lugar en el bloque de áreas, de acuerdo con esto los factores claves para una evaluación básica de la redundancia son la pérdida de funcionalidad y la flexibilidad, sin embargo, para una evaluación completa y detallada de la redundancia se requiere adicionalmente del periodo de resistencia, el periodo de propagación, el periodo de recuperación y la rapidez.

En la Figura 26, se presenta una curva teórica de desempeño la cual fue modificada para tener en cuenta dos o más escenarios (sistema original y sistema con alternativas redundantes), frente a una perturbación de igual magnitud y duración, en esta se resumen, el proceso de evaluación para alternativas redundantes presentado en la Figura 23, las condiciones para poder realizar dicha evaluación presentadas en la Figura 25 y se visualizan los efectos de inclusión de la redundancia descritos en la Tabla 3. Adicionalmente se incluye el estado de mejora o aprendizaje que se da cuando se supera la funcionalidad original del sistema y la rapidez asociada al tiempo de propagación.



t_o: momento de inicio del evento
t_i: momento de inicio de la falla
t_m: momento de máxima pérdida
t_f: momento de recuperación
t_n: periodo de análisis

d_o: desempeño inicial
d_m: desempeño mínimo
d_c: umbral de colapso
PP: periodo de propagación

A: estado de recuperación
B: estado de pérdida
C: estado de colapso
D: estado de mejora

Figura 26 Curva teórica de desempeño para más de un escenario

En la Figura 26, además de identificar gráficamente los factores para la evaluación de la redundancia, se identificó la utilidad de las curvas de desempeño como una herramienta para operativizar modelos conceptuales que requieran la cuantificación de estos factores. La importancia del esquema para dos o más escenarios radica en conocer la relación entre todos los componentes alrededor del factor en estudio, ya que pueden ser utilizados como descriptores de los cambios que ocurren en el sistema cuando se implementan nuevas alternativas.

7.2 Desarrollo del modelo conceptual para la evaluación de la redundancia

Los modelos que se utilizaron como base para el desarrollo de este modelo tienen en común que evalúan intervenciones artificiales o eventos naturales que finalmente afectan positiva o negativamente la resiliencia y factores de los sistemas estudiados; sin embargo, no se identificó la existencia de un modelo conceptual elaborado específicamente para la evaluación de la redundancia como factor de la resiliencia en SUD. La robustez fue el único factor identificado con modelos desarrollados para su análisis individual, como el elaborado por Mens *et al.*, (2011); también se identificaron modelos conceptuales alrededor de la resistencia, considerada de gran importancia para la compresión del comportamiento de los sistemas y la interacción entre factores, razón por la cual también fue considerada en el desarrollo del nuevo modelo.

El modelo conceptual para la evaluación de la redundancia se desarrolló sobre tres bloques temáticos que recogen los elementos identificados como claves para su evaluación en un SUD. El bloque temático inicial del modelo se denominó ***Sistema***, un sistema es una combinación de componentes que trabajan en sinergia para realizar colectivamente una función, razón por la cual este bloque se considera esencial, pues en él se describen los componentes que conforman el sistema, al ser el punto de partida se debe ser lo más preciso posible en su descripción, ya que un sistema mal definido dará lugar a intervenciones, resultados y conclusiones erradas.

Las estrategias y alternativas para generar redundancia en los sistemas de drenaje, son la respuesta a las alteraciones antropológicas o naturales que afectan el sistema, este conjunto de alteraciones se agrupó en un segundo bloque temático que se denominó ***Amenazas***, el cual se estableció como un bloque independiente ya que requiere de su propio proceso de identificación, para priorizar y establecer cuáles son las amenazas que tienen efectos directos sobre la funcionalidad del sistema, evaluación para estimar en que magnitud viene dada la amenaza y análisis para conocer si las amenazas con sus respectivas magnitudes representan un problema que el sistema construido no es capaz de controlar.

La redundancia representa la capacidad adicional por medio de elementos que son sustituibles y pueden activarse cuando ocurre una perturbación y por tanto la capacidad de absorber alteraciones o fallas que se presenten en el sistema; el tercer bloque temático que se denominó ***Alternativas***, comprende todas aquellas intervenciones estructurales que propician que la capacidad adicional se genere, sin importar la estrategia adoptada para obtener o aumentar la redundancia del sistema. Al igual que el bloque de amenazas este bloque requiere de un proceso de identificación, para priorizar y establecer las estrategias que se pueden aplicar, evaluación para poner a prueba las alternativas que incluye cada estrategia y análisis para conocer si dichas intervenciones fueron positivas para conservar la funcionalidad del sistema. Con los bloques temáticos definidos y la actividad principal que se desarrolla en cada uno, se planteó un primer modelo conceptual general de estructura cíclica para la evaluación de la redundancia.

En la Figura 27, se presenta un esquema del modelo conceptual general con los bloques temáticos que recogen los elementos necesarios para poder llevar a cabo la evaluación de la redundancia y la actividad esencial de cada bloque para garantizar el correcto funcionamiento del modelo.

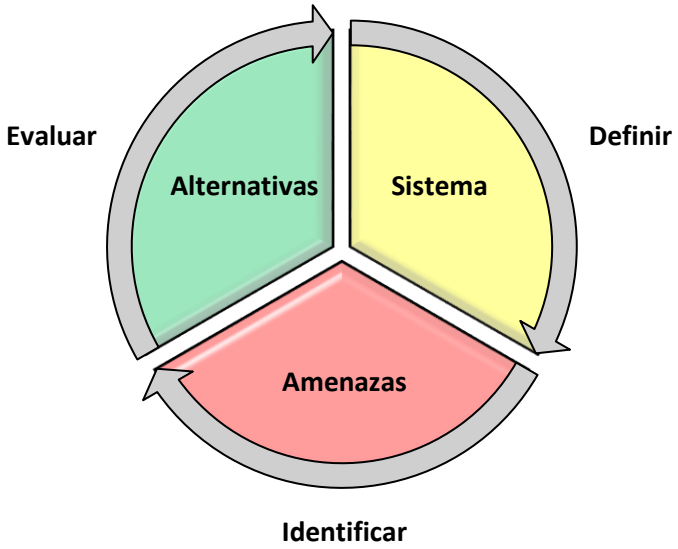


Figura 27 Modelo conceptual general para la evacuación de la redundancia

Para identificar aspectos más detallados de este primer modelo se realizaron subdivisiones en los bloques temáticos de acuerdo a las actividades que se desarrollan en su interior. En el bloque ***Sistema***, al igual que en los modelos desarrollados por Hwang *et al.*, (2015) y Hossein *et al.,* (2017), se realiza una única actividad que es definir el sistema con el fin de obtener una descripción detallada. En el bloque ***Amenazas*** se utiliza dicha descripción del sistema para identificar correctamente las amenazas que sobre el existen, debido a que este modelo se elaboró en torno a la capacidad del sistema, las amenazas que se identifiquen deben ser filtradas para trabajar solo sobre aquellas que afecten al sistema en términos de cantidad, estas amenazas deben idealmente ser evaluadas mediante la generación de escenarios que finalmente son analizados por medio de la curva teórica de desempeño para evidenciar sus efectos sobre el sistema.

Los resultados del bloque ***Amenazas***, son utilizados en el bloque ***Alternativas*** para seleccionar una o varias estrategias cuyas alternativas estén orientadas a realizar los controles respectivos para cada amenaza, el conjunto de alternativas resultantes debe filtrarse según la metodología o herramienta que vaya a utilizarse para hacer las evaluaciones, ya que en el caso de utilizar software para realizar esta actividad es probable que este no disponga de todas las alternativas que serían aplicables al sistema. Los efectos de las alternativas sobre el sistema finalmente deben ser analizados bajo la misma metodología que en el bloque de amenazas, para asegurar que los resultados sean comparables, razón por lo cual se debe utilizar nuevamente la curva teórica de desempeño. En la Figura 28, se presenta el modelo conceptual con los bloques temáticos desagregados en sus actividades.

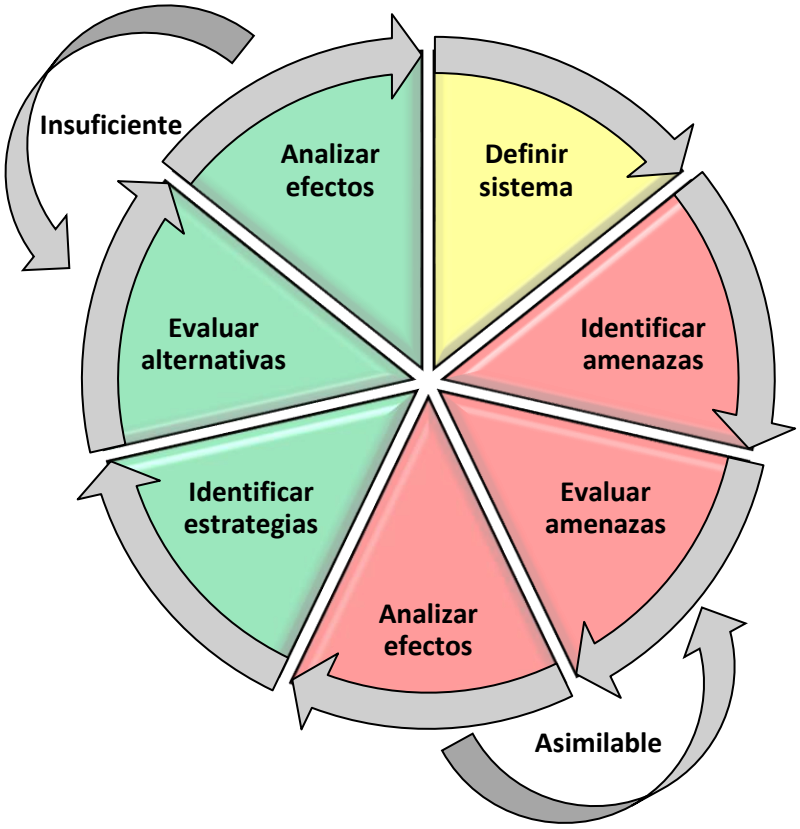


Figura 28 Modelo conceptual para la evacuación de la redundancia desagregado

Aunque los bloques temáticos ***Amenazas*** y ***Alternativas*** presentan las mismas actividades, cuentan con secuencias metodológicas diferentes. En la identificación de amenazas se tiene como objetivo encontrar las alteraciones reales del sistema, mientras que en la identificación de estrategias se buscan opciones para contrarrestar estas alteraciones entre los desarrollos tecnológicos que se tienen disponibles al momento de aplicar el modelo. La evaluación y análisis de amenazas se realiza con el fin de obtener información del comportamiento del sistema ante determinados escenarios adversos. Por su parte con la evaluación y análisis de alternativas se busca obtener información sobre como el sistema puede mantener niveles operativos aceptables sin comprometer la funcionalidad del sistema.

Dado que es posible que se presenten casos en los cuales las amenazas evaluadas tengan una magnitud tal que la capacidad instalada del sistema sea capaz de soportarlo, se incluyó en el modelo un retorno que indica que dicha amenaza en la magnitud evaluada es asimilable por el sistema, esto significa que no es necesario ningún elemento adicional para que el sistema funcione correctamente frente al escenario en estudio. Igualmente, para los casos en los que las alternativas evaluadas no arrojen los resultados esperados de absorción frente a la magnitud de las amenazas, se incluyó un segundo retorno que indica que dicha alternativa es insuficiente y debe replantearse para ser evaluada nuevamente. Con la información anterior se concluyó esta etapa de desarrollo del modelo, para darle paso al desarrollo de la secuencia metodológica que se da en cada bloque temático.

7.2.1 Sistema

Este bloque inicia con la definición de lo que será considerado sistema, para proceder con su caracterización, cuyo objetivo es obtener información precisa, se consideran esenciales los datos topográficos de la zona delimitada y de los elementos que conforman el sistema de drenaje, también se requiere la cantidad de cada elemento, los datos sobre los tipos de suelo que se presentan con sus usos presentes y proyectados para determinar los niveles de impermeabilidad de las áreas tributarias. En la Figura 29, se presenta la secuencia metodológica que se desarrolla en el interior de este bloque temático.

La información recolectada es la base para la construcción de un escenario único que represente al sistema de la manera más fiel posible en su condición inicial, con el fin de determinar su capacidad y obtener los elementos necesarios para la evaluación de amenazas en el bloque temático siguiente. Los ítems presentados en la Figura 29, recogen de manera general la información básica para una precisión aceptable del modelo, por ello cualquier información adicional de la que se disponga y contribuya a un mejor ajuste del modelo con la realidad debe ser tenida en cuenta.

7.2.2 Amenazas

Este bloque inicia identificando los factores susceptibles al cambio que presenta el sistema definido en el bloque temático anterior y como en el tiempo estos factores se convierten en un conjunto de amenazas. Las alteraciones que se presentan en este bloque buscan recoger las amenazas más comunes en un sistema de drenaje, sin embargo, el proceso de identificación debe realizarse para cada sistema en específico. En la Figura 30, se presenta la primera parte de la secuencia metodológica que se desarrolla en el interior de este bloque temático.

Una vez definido el grupo de amenazas, deben pasar por un proceso de filtrado, seleccionando las relacionadas con el parámetro de interés, en este caso aquellas que afectan la capacidad del sistema. Debido a que las amenazas no tienen el mismo grado de importancia y no es conveniente tratarlas simultáneamente, es necesario priorizarlas en función de la frecuencia o magnitud. La configuración inicial del sistema junto con la selección y priorización de amenazas, son la base para la formulación de escenarios y posterior evaluación como se presenta en la Figura 31.

Si el sistema en estudio ya se encuentra construido, los escenarios evaluados deben incluir amenazas de igual duración y magnitud que las reales, en el caso de presentar la resistencia suficiente a las amenazas actuales pueden utilizarse amenazas proyectadas en el modelo el cual cumplirá funciones de optimización identificando puntos de mejora en el sistema, consiguiendo que este sea más redundante y resiliente ante futuras amenazas. En la Figura 31, se presenta la segunda parte de la secuencia metodológica que se desarrolla en el interior de este bloque temático.

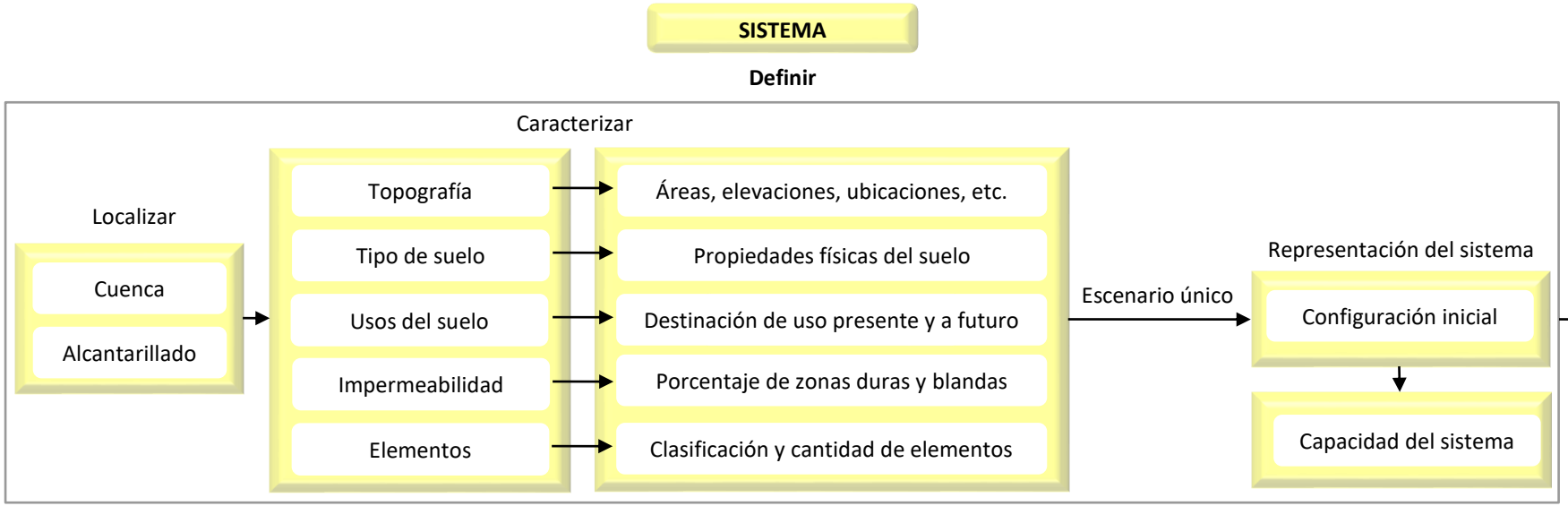


Figura 29 Secuencia metodológica del bloque temático ***Sistema***

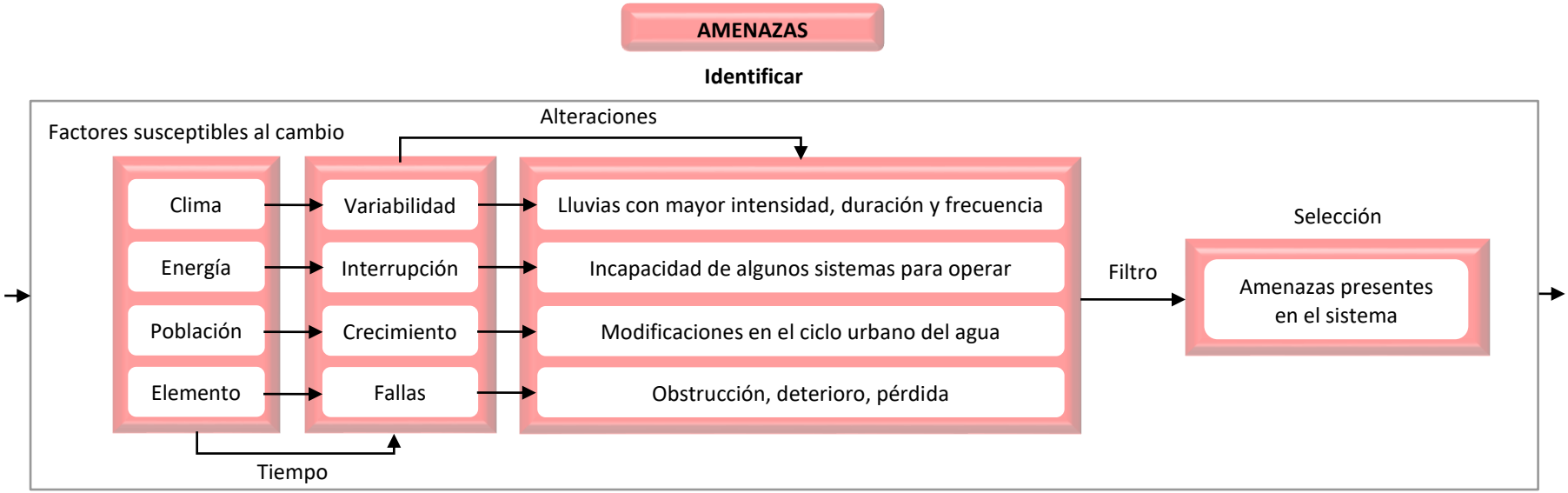


Figura 30 Secuencia metodológica del bloque temático ***Amenazas*** (parte 1)

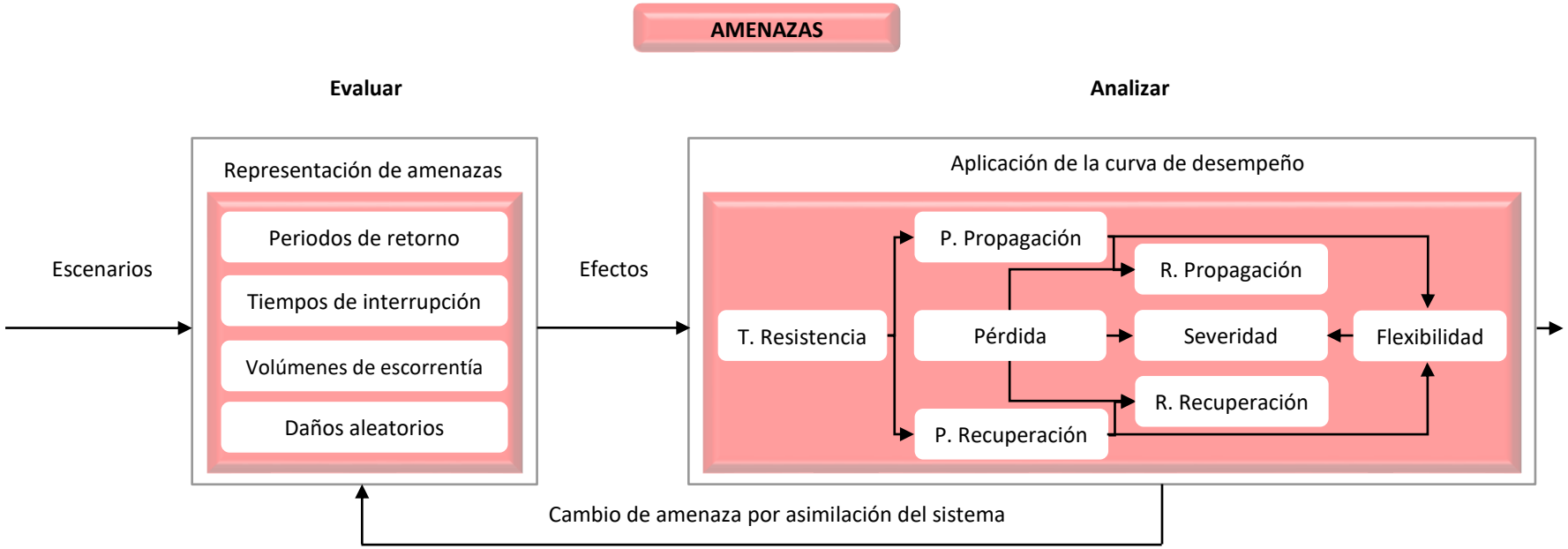


Figura 31 Secuencia metodológica del bloque temático ***Amenazas*** (parte 2)

Los resultados de la evaluación de amenazas se utilizan para construir la curva de desempeño del sistema ante cada amenaza, este conjunto de curvas que se generan es de utilidad para verificar si la priorización de amenazas realizada anteriormente corresponde en magnitud a los resultados obtenidos, por lo que puede presentarse un ajuste en dicha priorización. Adicionalmente esta información es requerida por el bloque temático posterior para seleccionar las estrategias y dimensionar las alternativas que serán necesarias para conseguir los efectos redundantes deseados.

7.2.3 Alternativas

Para identificar alternativas se debe realizar una búsqueda actualizada de las estrategias disponibles y sus posibles combinaciones para el control de las amenazas identificadas en el bloque temático anterior, los resultados de esa búsqueda deben pasar por un proceso de filtrado, seleccionando las alternativas que sea aplicables al sistema, posteriormente se debe seleccionar el método por el cual serán evaluadas estas alternativas verificando que dicho método cuente con la representación de la alternativa que se desea implementar, esta depuración deja como producto las alternativas seleccionadas para realizar la evaluación. En la Figura 32, se presenta la primera parte de la secuencia metodológica que se desarrolla en el interior de este bloque temático.

La evaluación de las alternativas seleccionadas pasa a ser analizada por medio de las curvas de desempeño, que al ser comparadas con las obtenidas en el bloque ***Amenazas***, permiten la evaluación de la redundancia para cada escenario, a través de la absorción de severidad, y la variación en los factores mencionados en la Figura 26 que sirven como descriptores de los cambios ocurridos en el sistema.

Tanto para el bloque temático de amenazas como el de alternativas, se necesita de una función que describa lo que sucede en el sistema para poder obtener una curva de desempeño, teniendo en cuenta que el presente modelo está orientado a la evaluación de la redundancia por medio de la capacidad del sistema y los volúmenes que en el interactúan, lo más adecuado es que dicha función se encuentre en términos de cantidad, sin embargo, el modelo también puede ser utilizado para evaluar la redundancia en términos de calidad y otros aspectos de manera individual o simultáneamente, para lo cual solo se requiere desarrollar la función adecuada. En la Figura 33, se presenta la segunda parte de la secuencia metodológica que se desarrolla en el interior de este bloque temático.

Debido a la dependencia de cada bloque con los resultados su bloque inmediatamente anterior, es necesario que cada uno se desarrolle de la manera más precisa posible para no transmitir y amplificar el error en los bloques siguientes. A pesar que la redundancia no debe ser una externalidad de un diseño ineficiente, el modelo es de gran utilidad para sistemas construidos por la existencia de registros que facilitan la elaboración del escenario base y los escenarios de amenazas con mayor exactitud. En la Figura 34, se presenta la secuencia metodológica de los bloques temáticos integrada.

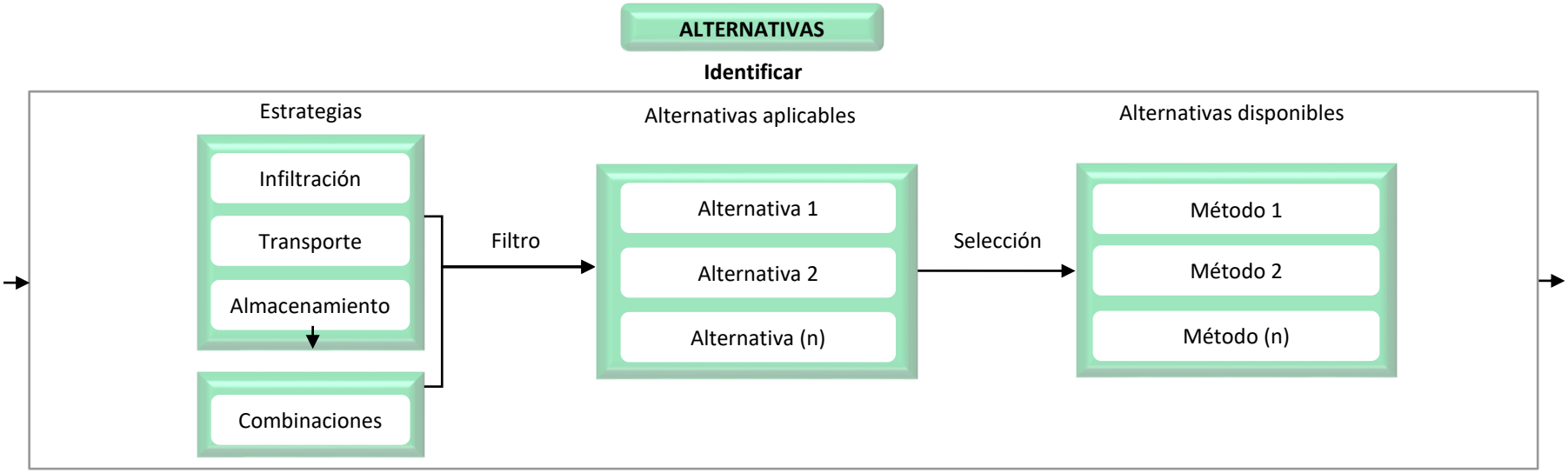


Figura 32 Secuencia metodológica del bloque temático ***Alternativas*** (parte 1)

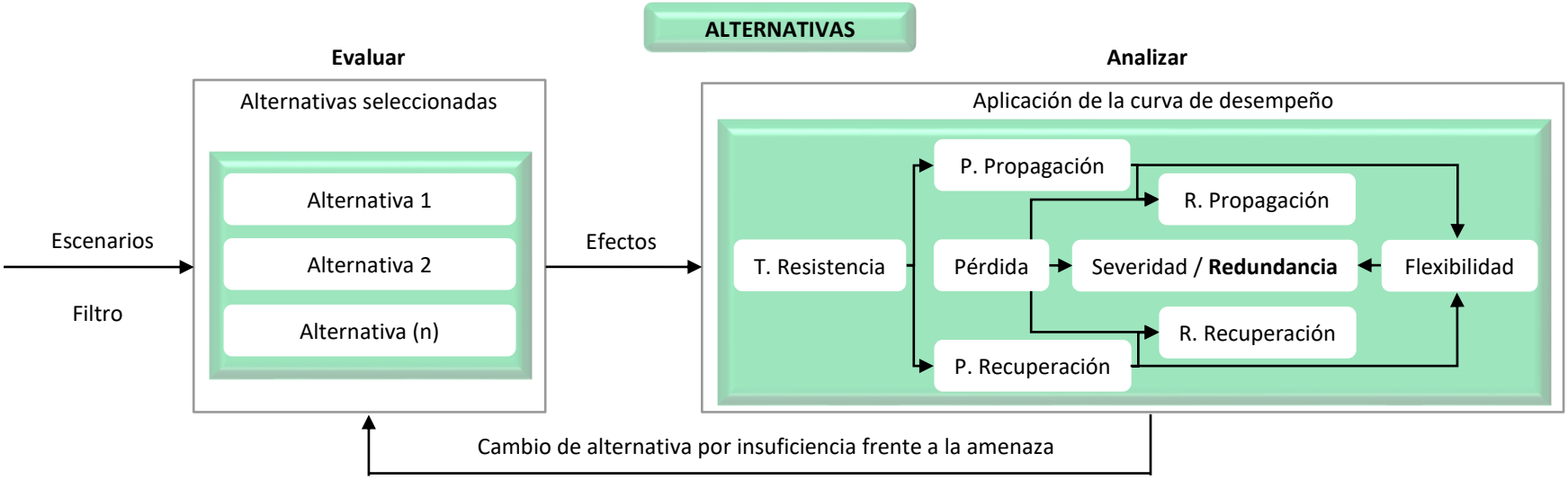
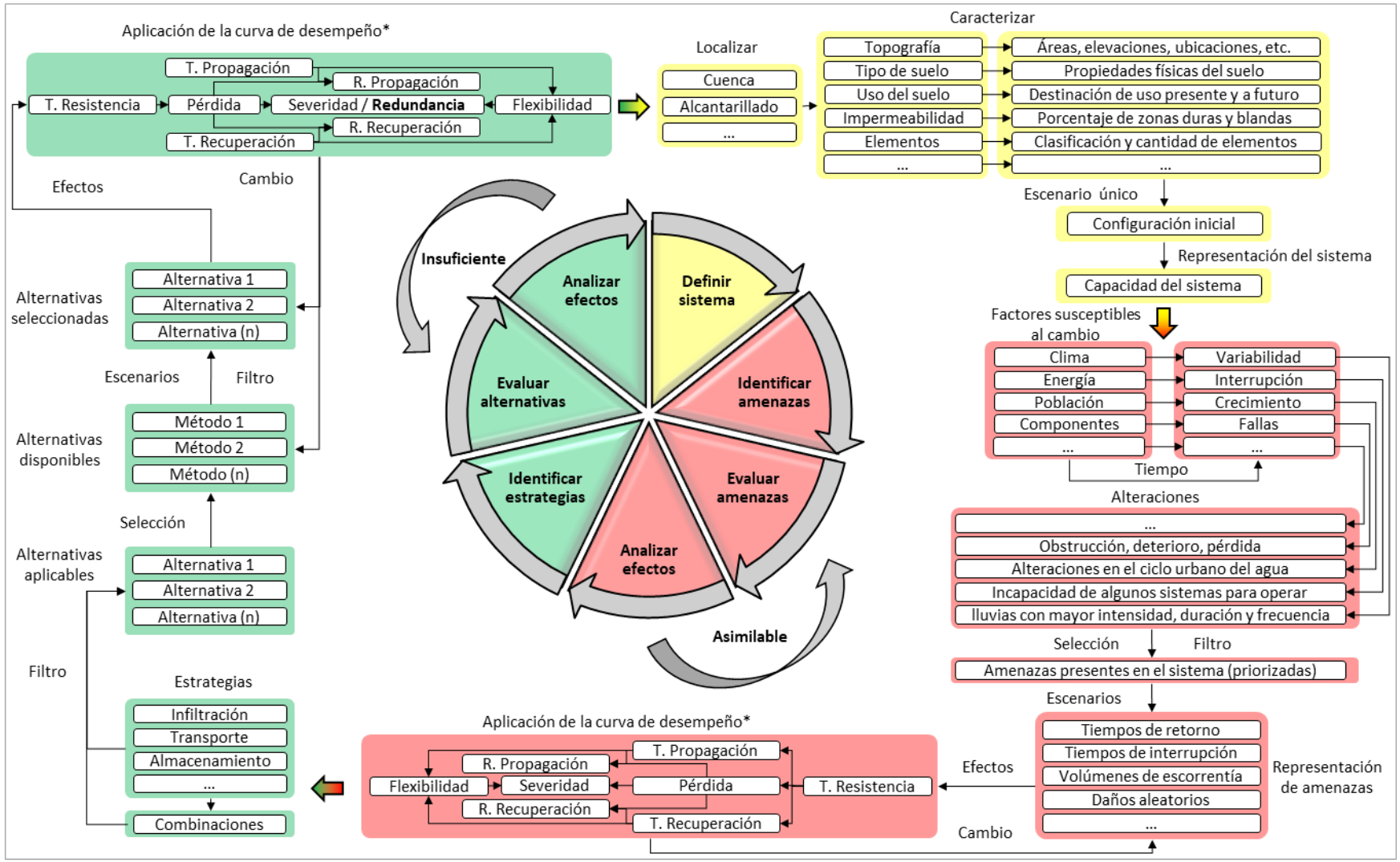


Figura 33 Secuencia metodológica del bloque temático ***Alternativas*** (parte 2)



(...) Elementos particulares de cada caso (*) Requiere la definición de una función de desempeño

Figura 34 Modelo para la evaluación de la redundancia (secuencia metodológica integrada)

La mayoría de modelos desarrollados alrededor de la resiliencia, ignoran el hecho que su configuración pude ser utilizada para evaluar y potenciar los efectos positivos de los factores que la componen, entre ellos la redundancia; el presente modelo fue desarrollado para conocer al detalle los cambios que se producen con alternativas que poseen un mismo valor de redundancia, sin embargo, este también puede ser utilizado para cuantificar la redundancia para los casos en los cuales el valor no es conocido.

De acuerdo con la definición de redundancia esta no debe una externalidad producto de un diseño ineficiente, por lo cual, lo normal es conocer el valor de la redundancia que se está incluyendo en el sistema desde que este es concebido, sin embargo esto no significa que una redundancia no pueda ser incluida en un sistema ya construido y que si se desconoce su valor este no pueda ser calculado, por ello no debe confundirse la cuantificación de la redundancia con su evaluación, que hace referencia al comportamiento de los factores que la conforman.

El modelo difiere de los modelos existentes que tienen en cuenta aspectos que de acuerdo a la evolución del concepto de resiliencia hacen parte de otros factores, como lo son aspectos políticos y sociales. Las características que se adoptan de los modelos existentes son la configuración básica, sistema, cambio y efecto; la estructura cíclica que representa que los sistemas de drenaje son dinámicos, por lo que a pesar de ser importante en algunos casos realizar evaluaciones estáticas estos realmente no están en un estado de equilibrio; la generación de escenarios como herramienta para evaluar diferentes alternativas y el conocimiento de toda la información posible del sistema antes, durante y después de su evaluación, para tener más elementos que permitan tomar decisiones óptimas.

En este modelo no se llega a cuantificar y evaluar la resiliencia, debido a que esta requiere de la integración de otros factores sociales y económicos como es el caso de recursividad, que están fuera del alcance del presente trabajo, pero que se integraran en el desarrollo del proyecto macro que tiene como objetivo conseguir una valoración integral de la resiliencia y del cual este trabajo hace parte.

7.3 Aplicación del modelo

Para la aplicación del modelo propuesto (ver Figura 34), el sistema de drenaje de la cuenca del río Lili presentado en la Figura 19, fue calibrado mediante la metodología Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), utilizando como medida de ajuste el coeficiente de Nash-Sutcliffe obteniendo un valor de 0.94. Una vez realizada la caracterización y configuración del sistema en SWMM se procedió con la identificación de la amenaza a tratar.

Debido a que de los factores susceptibles al cambio para este sistema solo se tuvo en cuenta la variabilidad climática, se trabajaron eventos de precipitación de magnitud creciente, razón por la cual se decidió evaluar eventos con tiempos de retorno desde los 2 hasta los 10 años, descartando aquellos asimilables por la capacidad de transporte del sistema, hasta detectar aquellos que ocasionan fallas funcionales.

7.3.1 Amenaza

En la primera simulación del sistema para un evento de precipitación con un tiempo de retorno de 2 años se cuantifico una inundación total de 28,431 m^3 distribuida en 20 nodos, de los cuales el nodo critico en magnitud presento una inundación de 17,302 m^3 y el nodo critico en duración fallo durante 4.42 h, al encontrar este nivel de falla con el primer periodo de retorno probado se decidió continuar con la aplicación del modelo bajo esta amenaza ya que el objetivo era demostrar la aplicabilidad del modelo y una vez encontrado un nivel de falla en el sistema el procedimiento seria exactamente el mismo para cualquier otro tiempo de retorno que ocasionara fallas funcionales. En la Tabla 4, se presentan los resultados del localización y cuantificación del volumen y duración de inundación total por cada nodo afectado.

Tabla 4 Localización, cuantificación y duración de inundaciones en el sistema.

Ubicación	Inundación (m3)	Duración (h)
ND213	304.35	0.67
ND225	832.16	0.33
ND227	433.67	0.33
ND237	221.26	0.33
ND242	83.18	0.17
ND243	346.22	0.33
ND244	66.28	0.17
ND284	1592.18	0.67
ND286	1436.46	0.67
ND288	1185.34	0.67
ND290	363.46	0.33
ND291	119.73	0.33
ND292	50.62	0.17
ND298	160.37	0.25
ND299	20.46	0.25
ND496	892.57	0.50
ND655	1646.34	0.75
ND758	17302.61	3.42
ND759	1160.24	4.17
ND760	214.01	4.42

El conjunto de funciones desarrolladas en Matlab, capturo los valores de volumen de inundación para cada nodo durante cada segundo al igual que los valores de los volúmenes producidos en cada subcuenca para alimentar la función de desempeño y posteriormente realizar la construcción de la curva de desempeño correspondiente al escenario que representa a la amenaza, la cual se presenta a continuación en la Figura 35.

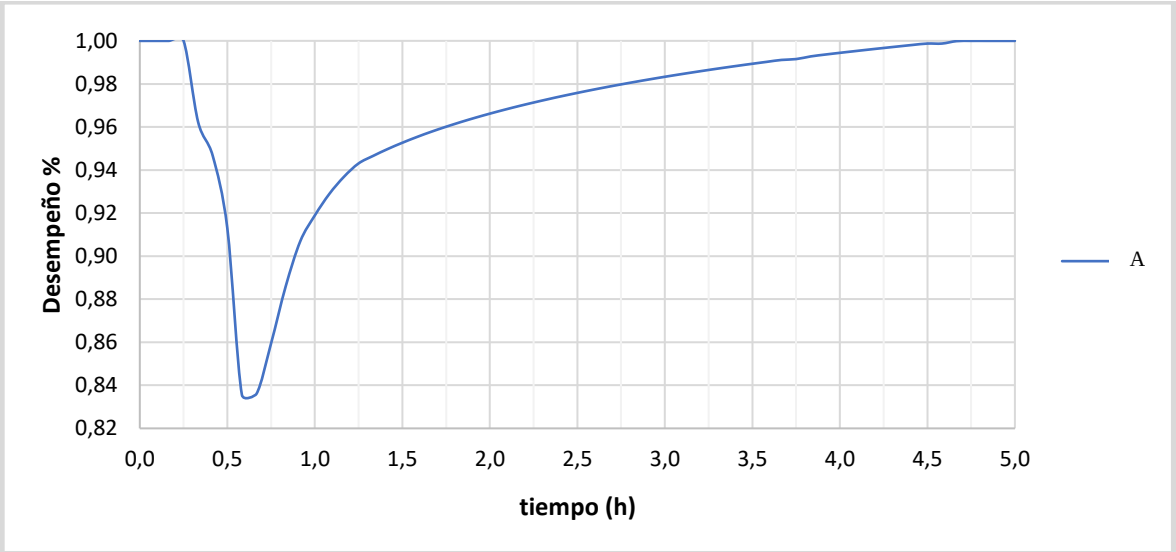


Figura 35 Curva de desempeño del sistema ante la amenaza

Tras el análisis de la curva de desempeño del sistema de drenaje de la cuenca de rio Lili ante un evento de precipitación con un periodo de retorno de dos años se obtuvieron los resultados iniciales de resistencia, pérdida, propagación, recuperación y flexibilidad, estos resultados se presentan a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5 Factores del desempeño del sistema ante la amenaza.

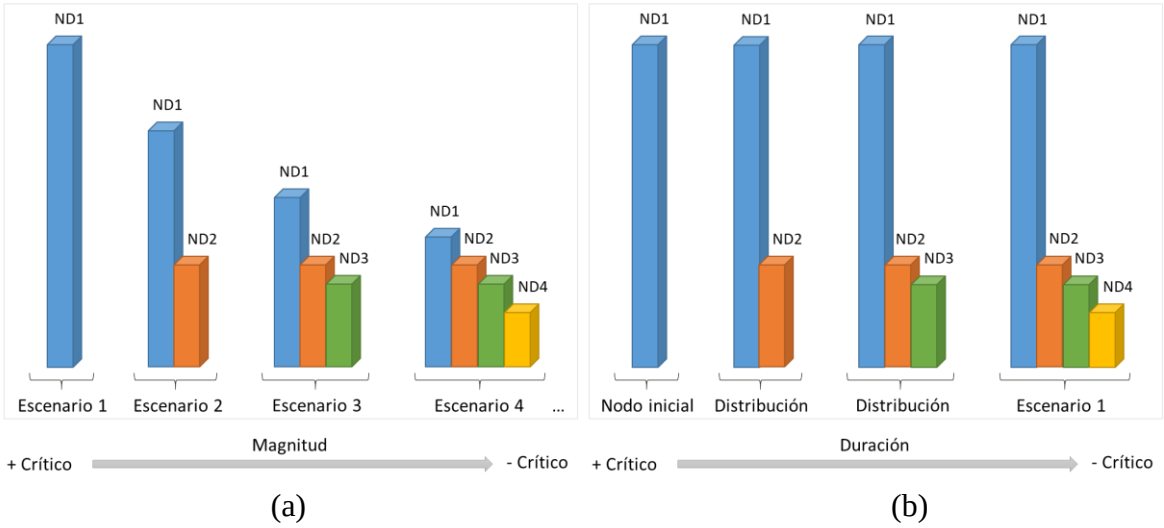
Escenario	Resistencia (h)	Pérdida (%)	Propagación (h)	Recuperación (h)	Flexibilidad (h)
Amenaza	0.33	16.44	0.33	4.08	4.42

De acuerdo con los valores de la Tabla 5, la resistencia de la capacidad instalada en el sistema de drenaje tuvo una duracion de 0.33 h para el evento Tr: 2, ya que pasado este tiempo iniciaron las inundaciones en el sistema, estas inundaciones llevaron a una perdida de funcionalidad maxima del 16.44 %, el periodo de propagacion requerido para alcanzar este valor de perdida fue de 0.33 h con una tasa de 49.31 %/h, el sistema inicio su periodo de recuperacion a las 0.66 h de iniciado el evento, tardando 4.08 h en estabilizarse a una tasa de 4.03 h/%, con lo cual la falla funcional del sistema presento una duracion de 4.42 h.

Los resultados de la Tabla 4 y Tabla 5 fueron utilizados para establecer las configuraciones de los escenarios para la evaluacion de la redundancia que de acuerdo con el proceso de las funciones desarrolladas en Matlab presentado en la Figura 22, se basan en el valor del volumen de inundación en el nodo critico que en este caso corresponde al nodo ND758 el cual presento un valor de inundación de 17,302 m^3. Conseguir captar este volumen de inundación significa tener una redundancia del 60.86 % que es la capacidad de absorcion sobre los 28,431 m^3 de inundación total. Las formas en las que se propuso captar este volumen se presentan en el siguiente ítem.

7.3.2 Generación de escenarios

La redundancia al igual que la resiliencia y la severidad al ser un factor que se representa como un área en la curva de desempeño, le aplica el concepto de no linealidad, con lo cual a pesar de tener el mismo valor de redundancia para distintos escenarios, se pueden presentar variaciones en los factores que la conforman, permitiendo detectar las configuraciones para un determinado valor de redundancia que son mas favorables para el sistema. En la Figura 37 se presenta un esquema que muestra la forma en la que fue distribuido el volumen redundante para cada uno de los escenarios basados en la magnitud de la inundacion y el escenario basado en la duracion de la inundacion, los valores correspondientes a la distribucion del volumen redundante para cada escenario se presentan en el Anexo 2.



(a) (b)

Figura 36 Procedimiento para la generación de escenarios basados en (a) magnitud de la inundación (b) duración de la inundación.

La distribución del volumen redundante se realizó considerando la estrategia de almacenamiento, la cual se llevó acabo por medio de la alternativa de tanques. Para el caso de los escenarios basados en la magnitud de la inundación el volumen redundante fue distribuido de manera descendente desde el nodo más crítico hasta el menos crítico (en magnitud), siempre que la absorción completa de la falla funcional del nodo siguiente fuera posible. En el sistema de drenaje de la cuenca del rio Lili para un Tr: 2, este procedimiento arrojo un total de 20 posibles configuraciones (escenarios).

Para el escenario basado en duración se trató de una configuración única en la cual el volumen redundante fue distribuido de manera descendente desde el nodo más crítico hasta el menos crítico (en duración), sin importar que la absorción de la falla funcional del nodo siguiente fuera completa, tomando simplemente los nodos con mayor duración de inundación hasta que su magnitud fuese igual a los 17,302 m^3, con lo cual se obtuvo un total de 21 escenarios.

7.3.2.1 Escenarios basados en la magnitud de la inundación

Una vez ejecutados los 20 escenarios y construida la curva de desempeño para cada uno, estas fueron sobrepuestas junto al escenario de amenaza para identificar el comportamiento del sistema a medida que mas nodos con fallas funcionales era intervenidos. Los valores de la función de desempeño para estos 20 escenarios se presenta en el Anexo 3. En la Figura 37, se presentan las curvas de desempeño obtenidas para los escenarios de magnitud, donde el numero del escenario corresponde al numero de intervenciones realizadas sobre el sistema.

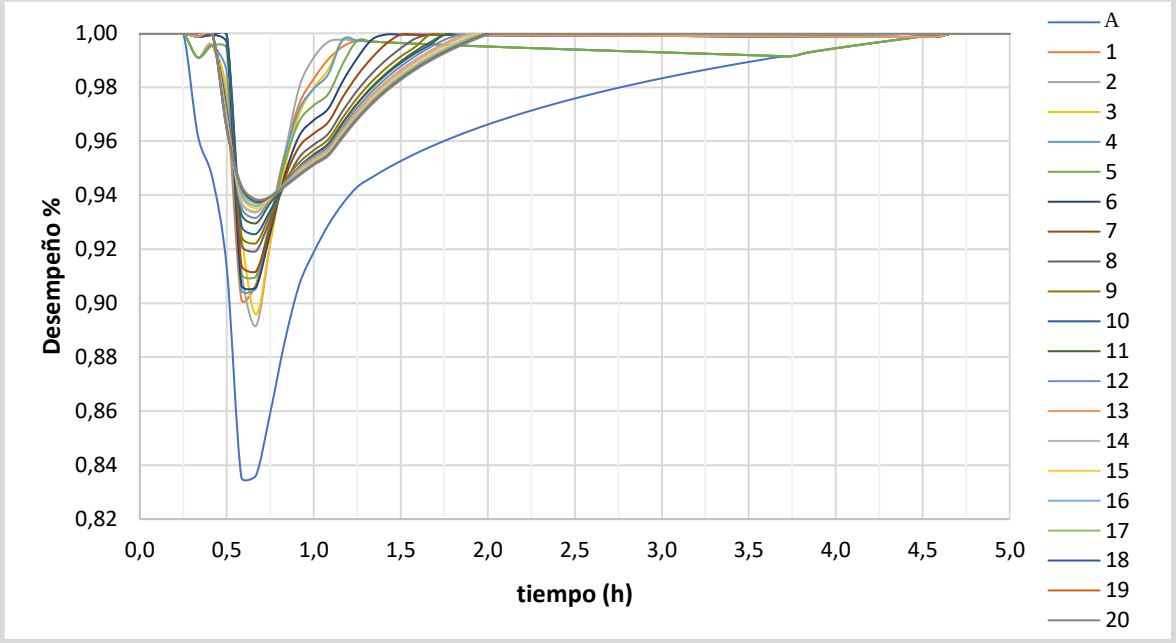


Figura 37 Curvas de desempeño para escenarios basados en magnitud

De acuerdo con la Figura 37, las curvas de los 20 escenarios tienen el mismo valor de redundancia, sin embargo, se apreciaron variaciones principalmente en la pérdida de funcionalidad y el periodo de recuperación, donde a mayor número de nodos intervenidos se obtuvo una tendencia a la disminución de la pérdida de funcionalidad. Lo anterior no significa que la solución óptima sea un mayor número de unidades de almacenamiento, ya que estos resultados técnicos deben ser contrastados posteriormente con análisis económicos, de disponibilidad de áreas y con las variaciones presentes en los otros factores de la curva de desempeño.

Construidas las curvas de desempeño, se obtuvieron y listaron automáticamente los valores para resistencia, perdida, propagación, recuperación y flexibilidad como descriptores de la redundancia en cada escenario los cuales se presentan en la Tabla 6. El porcentaje de aumento o reducción de cada uno de los factores respecto al escenario de amenaza, incluyendo la rapidez asociada al periodo de propagación y al periodo de recuperación del sistema se presentan en el Anexo 4.

Tabla 6 Factores del desempeño del sistema.

Escenario	Resistencia (h)	Pérdida (%)	Propagación (h)	Recuperación (h)	Flexibilidad (h)
1	0.33	9.85	0.33	4.08	4.42
2	0.33	10.85	0.42	4.00	4.42
3	0.33	10.41	0.42	4.00	4.42
4	0.33	9.49	0.33	4.08	4.42
5	0.33	9.02	0.42	4.00	4.42
6	0.33	9.42	0.42	4.00	4.42
7	0.33	8.83	0.42	4.00	4.42
8	0.33	8.08	0.42	4.00	4.42
9	0.33	7.78	0.42	4.00	4.42
10	0.33	7.44	0.42	4.00	4.42
11	0.33	7.04	0.42	4.00	4.42
12	0.33	6.84	0.42	4.00	4.42
13	0.33	6.61	0.42	4.00	4.42
14	0.50	6.65	0.25	1.17	1.42
15	0.50	6.48	0.25	1.25	1.50
16	0.50	6.40	0.25	1.25	1.50
17	0.50	6.31	0.25	1.25	1.50
18	0.50	6.24	0.25	1.33	1.58
19	0.50	6.17	0.25	1.33	1.58
20	0.50	6.15	0.25	1.33	1.58

La resistencia del escenario de amenaza fue de 0.33 h valor que se conservó desde el escenario 1 hasta el escenario 13, sin embargo, desde el escenario 14 hasta el escenario 20 se consiguió aumentar la resistencia hasta las 0.5 h, lo que represento un aumento del 50 % respecto al escenario de amenaza. Se esperaba que la pérdida de funcionalidad en todos los escenarios disminuyera considerablemente tras la inclusión de una alternativa con una redundancia del 60.86 %, sin embargo, se obtuvieron variaciones considerables para este factor con la distribución de un mismo volumen redundante, que fueron desde el 6.15 % hasta el 10.85 %, consiguiendo mejoras entre el 62.59 % y 34 % respectivamente, escenario 20 fue el mejor en esta característica.

La propagación de la inundación que inicialmente ocurrió en 0.33 h consiguió disminuirse desde el escenario 14 hasta el escenario 20 en un 25 %, lo cual está directamente relacionado con el aumento de la resistencia y los balances que se dan al interior de la curva de desempeño. El periodo de recuperación para el escenario de amenaza fue de 4.08 h el cual logro disminuirse un 71.43 % con el escenario 14, el mejor en esta característica, llegando hasta 1.17 h, esto debido a que con la configuración de este escenario se alcanzó una rapidez de 5.70 h/% lo que representa una mejora del 41.49 % frente a la rapidez del 4.03 h/% que presento el escenario de amenaza.

La flexibilidad o duración total de la inundación corresponde a la suma de los periodos de propagación y recuperación por lo que es de esperarse que los escenarios que tuvieron los menores tiempos en estos dos factores presenten las menores duraciones de inundación, siendo el escenario 14 el mejor en este aspecto con una duración de inundación de 1.42 h fue un 67.92 % mejor que las 4.42 h del escenario de amenaza. En la Tabla 7 se presentan los escenarios más favorables para conseguir mejoras en cada factor, en los casos que no se pudo identificar el más favorable por tener igual valor se indicó el rango de dichos escenarios.

Tabla 7 Escenarios basados en magnitud más favorables para el sistema

Factor	Resistencia	Pérdida	Propagación	Recuperación	Flexibilidad
Escenarios favorables (Magnitud)	14 a 20	20	14 a 20	14	14

En general los escenarios 14 y 20 presentaron las condiciones más favorables para una redundancia del 60.86 %, pero debido a que el escenario 14 consiguió los mismos valores de resistencia y propagación y mejores valores de recuperación y flexibilidad con 6 intervenciones menos sobre el sistema, se convierte en la mejor configuración para este conjunto de escenarios, a pesar que la perdida fue el único factor que no pudo ser superado por el valor obtenido en el escenario 14 la diferencia fue de solo 0.5 %, valor que aunque es superior no justifica las 6 intervenciones adicionales. En la Figura 38, se presentan las curvas de desempeño de los escenarios 14 y 20 junto al escenario de amenaza.

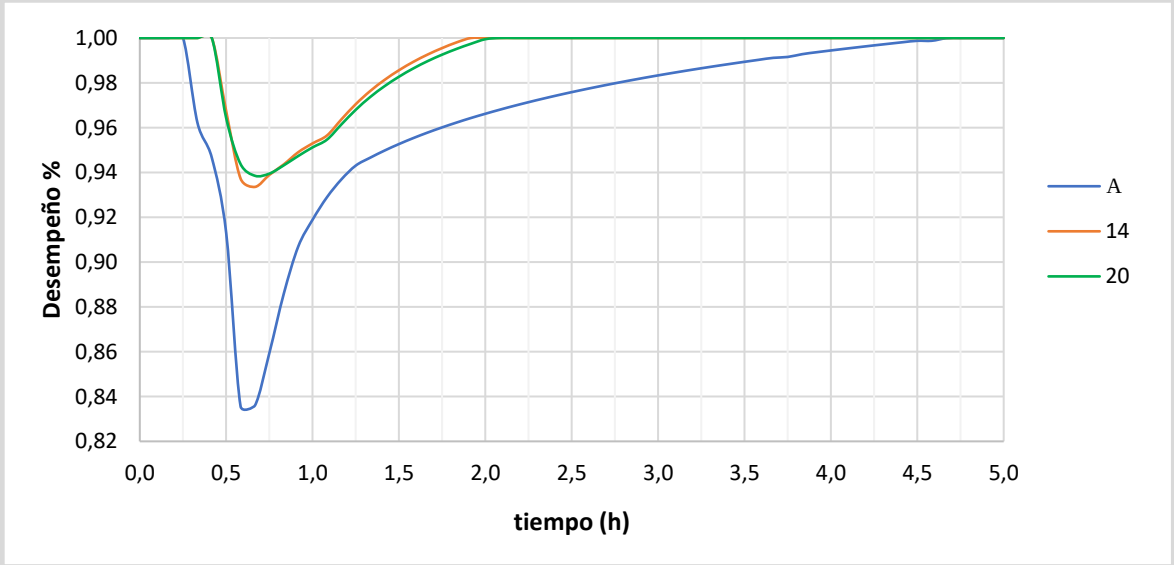


Figura 38 Curvas de desempeño para escenarios basados en magnitud más favorables

7.3.2.2 Escenario basado en la duración de la inundación

la evaluación de la redundancia por medio de escenarios basados en la duración de las inundaciones con distribución del volumen de almacenamiento de manera descendente entre los nodos con fallas funcionales genero un escenario en el que solo fueron intervenidos 3 nodos, la configuración de distribución del volumen redundante en este escenario se presenta en el Anexo 2 y sus valores de la función de desempeño se presentan en el Anexo 3. La curva de desempeño obtenida para este escenario se presentan a continuación en la Figura 39.

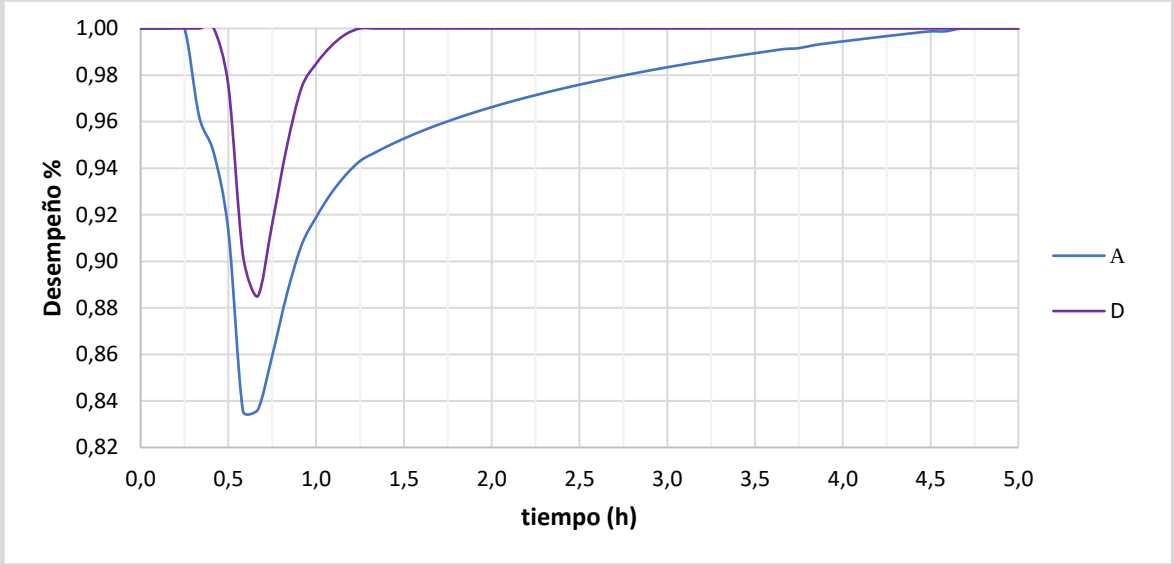


Figura 39 Curva de desempeño para el escenario basado en duración

De acuerdo con la Figura 39, la curva de desempeño representa el mismo valor de redundancia que los escenarios basados en magnitud, sin embargo, a excepción de la pérdida de funcionalidad se apreciaron variaciones favorables significativas en todos los factores que se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8 Factores del desempeño del sistema.

Escenario	Resistencia (h)	Pérdida (%)	Propagación (h)	Recuperación (h)	Flexibilidad (h)
Duración	0.5	11.50	0.25	0.5	0.75

De acuerdo con los valores de la Tabla 8, la resistencia bajo este escenario obtuvo una mejora respecto al escenario de amenaza del 50 %, pasando de tener inundaciones a 0.33 h de iniciado el evento a 0.5 h, este resultado es equivalente al mejor resultado obtenido en el conjunto de escenarios basados en magnitud, con la diferencia que en dichos escenarios se requirió la intervención de 14 nodos para conseguir este valor, mientras en este escenario solo fue necesaria la intervención de 3 nodos.

Respecto a la pérdida de funcionalidad este escenario consiguió un resultado del 11.50 % que si bien representa una disminución del 30.01 % frente a la pérdida del 16.44 % del escenario de amenaza, es un valor inferior a los resultados obtenidos en todos los escenarios basados en magnitud donde el rango de pérdida fue de 6.15 % hasta 10.41 %. La propagación de la inundación mejoro un 25 % pasando de 0.33 h a 0.25 h, este resultado es equivalente al mejor resultado obtenido en el conjunto de escenarios basados en magnitud con 14 intervenciones, con lo cual a pesar de conseguir los mismos resultados se utilizaron 11 tanques menos, convirtiéndolo en una mejora significativa.

El periodo de recuperación logro reducirse en un 87.76 % pasando de las 4.08 h del escenario de amenaza a 0.5 h, este tiempo fue mejor que la recuperación de 1.17 h conseguida en el mejor de los escenarios basados en magnitud, superándolo en un 57.26 %, lo cual hizo de esta característica una de las más relevantes para este escenario. La gran mejora que se presentó en el periodo de recuperación se vio reflejada en la flexibilidad del sistema que paso de 4.42 h en el escenario amenaza a 0.75 h, consiguiendo una mejora del 83.02 % y respecto al mejor de los escenarios basados en magnitud se obtuvo una mejora del 47.18 %.

7.3.3 Selección del mejor escenario

Son evidentes las mejoras que presenta el escenario basado en la duración de la inundacion, ya que en la mayoría de factores consiguió igualar o mejorar los resultados de los escenarios basados en la magnitud de la inundacion, con un numero menor de intervenciones sobre el sistema. Sin embargo, el control de la pérdida de funcionalidad no es el punto fuerte de este escenario, que a pesar de conseguir mejoras respecto al escenario de amenaza no puede competir contra las opciones de distribución que cuentan con un mayor numero de intervenciones. En la Tabla 9 se presentan los escenarios mas favorables para conseguir mejoras en cada factor con una redundancia del 60.86 %.

Tabla 9 Escenarios basados en magnitud y duración más favorables para el sistema

Factor	Resistencia	Pérdida	Propagación	Recuperación	Flexibilidad
Escenarios favorables	Duración	14	Duración	Duración	Duración

De acuerdo con los valores de la Tabla 9 el escenario basado en duracion potencia en mayor medida las propiedades de la redundancia en el sistema de drenaje de la cuenca del rio Lili para un evento Tr: 2, la selección del esceario 14 podria ser la mejor configuracion si el objetivo principal fuera disminuir la perdida de funcionalidad sin importar que el periodo de recuperacion se extienda considerablemente, lo cual podria convertirse en un riesgo mayor debido a que si antes de finalizar el periodo de recuperacion ocurre otro evento de cualquier magnitud el sistema no estaria en capacidad de responder, haciendo inutil cualquier elemento redundante y disminuyendo la resiliencia. En la Figura 40, se presenta la mejor curva de desempeño para cada grupo de escenarios y el escenario amenaza.

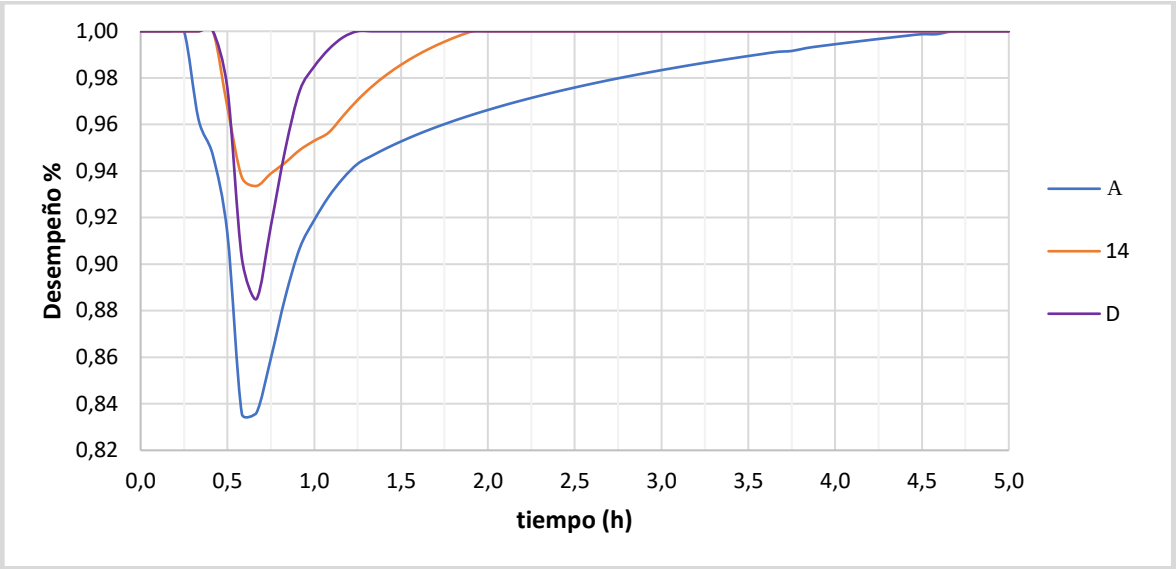


Figura 40 Curvas de desempeño más favorables para el sistema

De acuerdo con la Figura 40, la diferencia entre los 2 mejores escenarios respecto a su pérdida de funcionalidad no es tan significativa como lo es la diferencia en los factores que se expresan en términos del tiempo, por cual se puede afirmar que el escenario más favorable para el sistema frente a un evento Tr: 2, es el basado en la duración de las inundaciones. En la Figura 41, se presenta una comparación del comportamiento porcentual de mejora para cada factor en todos los escenarios, donde A representa el escenario de amenaza, los números del 1 al 20 los escenarios basados en la magnitud de la inundación y en el 3 de manera individual los resultados del escenario basado en duración.

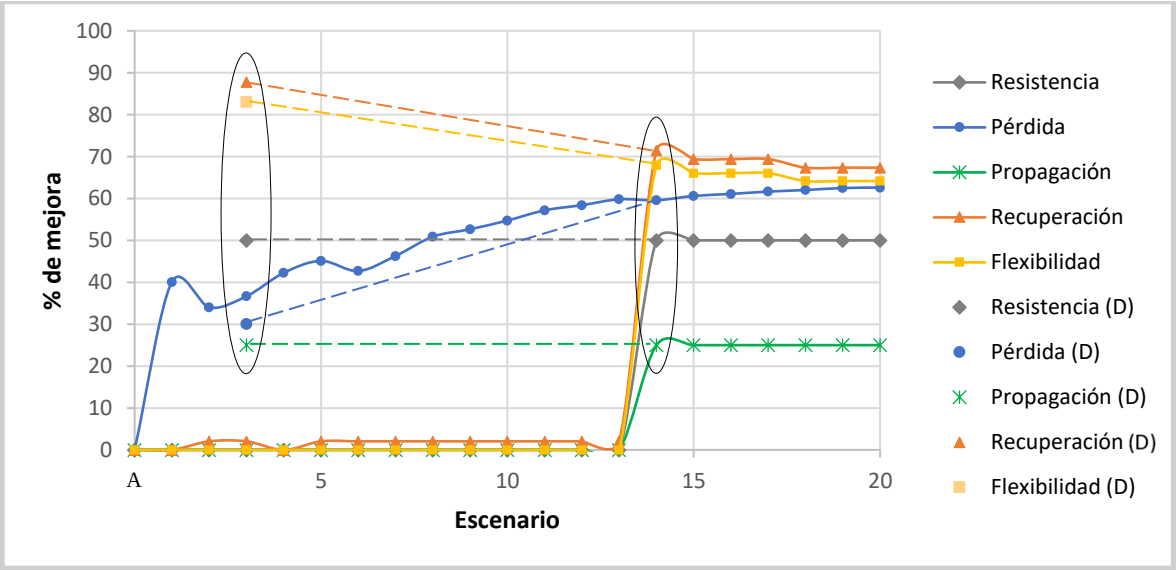


Figura 41 Comportamiento del porcentaje de mejora para cada factor

7 CONCLUSIONES

- La revisión sugiere que los estudios anteriores han tenido correctamente la pérdida y la flexibilidad como factores clave al momento de evaluar alternativas redundantes, sin embargo, el uso de todos los factores que se ven alterados por la inclusión de la redundancia permite una mejor compresión de los procesos que se dan en un sistema de drenaje por el uso de estas alternativas.

- La redundancia se ha estudiado indirectamente por medio de la resiliencia y aunque el avance ha resultado positivo para los SUD, en este trabajo la severidad se plantea como el indicador ideal para este factor, debido a que su existencia es la razón por la cual se implementa alternativas redundantes.

- El modelo conceptual desarrollado se constituye de un bloque de descripción del sistema, un segundo bloque de detección de amenazas y un último bloque de evaluación de alternativas en el cual se utiliza el concepto de curva teórica de desempeño como herramienta para realizar la evaluación de la redundancia.

- La metodología desarrollada para la evaluación de la redundancia puede ser utilizada como herramienta de optimización frente perturbaciones de magnitudes específicas, ya que se pueden incluir alteraciones sintéticas que permitan fortalecer el sistema sin que este fallando realmente.

- El uso del modelo potenciado con herramientas informáticas proporciona una mayor utilidad debido a que en un corto periodo de tiempo puede encontrarse la localización optima en la que esta alternativa alcanza su máxima eficiencia, haciendo que el valor de resiliencia bruta y neta sean lo más cercanos posible.

- La metodología planteada en el presente trabajo ofrece una solución rápida para la evaluación de la redundancia y óptima localización de alternativas redundantes en SUD, sin importar el tamaño del sistema de drenaje, la cantidad de fallas, la magnitud y duración de las perturbaciones.

- A diferencia de la metodología tradicional donde el escenario descentralizado se basa en contener la escorrentía en la salida de las subcuencas, para evitar rápidas concentraciones en los colectores, esta metodología explora diversos escenarios de manera automática para alternativas descentralizadas, consiguiendo reducir el número de intervenciones en el sistema mientras se maximizan las propiedades de la redundancia.

- La generación automática de escenarios a partir del nodo critico favorece el porcentaje de uso de las alternativas instaladas, lo cual disminuye considerablemente las variaciones en el valor de redundancia que se presentan en la metodología tradicional.

- Es posible tener un único valor de redundancia para varios escenarios que haga difícil identificar una selección optima de alternativas, pero con la metodología de desarrollada es posible identificar características diferenciales que faciliten esta selección, características que son imperceptibles con la metodología tradicional.

- La introducción de tanques de almacenamiento centralizados no es efectiva para minimizar la pérdida resultante de la funcionalidad del sistema con respecto al volumen total de inundación y la duración de la inundación.

- La introducción de tanques de almacenamiento descentralizados reduce significativamente la pérdida resultante de la funcionalidad del sistema con respecto al volumen total de inundación y la duración de la inundación.

- El uso de escenarios basados en la magnitud de las inundaciones demostró ser el más efectivo para reducir los valores de pérdida de funcionalidad, reduciéndolos hasta en un 62.59 %, sin embargo, se requiere de una mayor distribución espacial de la redundancia, lo que implica la construcción de más unidades de almacenamiento.

- El uso de escenarios basados en la duración de las inundaciones demostró ser el más efectivo en general, consiguiendo reducir hasta en un 83.02 % la duración de la inundación y en un 87.79 % el periodo de recuperación del sistema.

- Para la resistencia y el periodo de propagación los escenarios basados en magnitud y el escenario basado en duración obtuvieron los mismos resultados, con la diferencia que el escenario basado en duración siempre fue más efectivo en cuanto a la distribución espacial de la redundancia, requiriendo de un menor número de unidades de almacenamiento.

8 RECOMENDACIONES

- El modelo de evaluación de la resiliencia que se basa en la curva teórica de desempeño cuenta con las condiciones ideales para realizar el estudio de la inclusión de nuevos factores, dado que permite estudiar las relaciones entre factores con base en sus definiciones, sin necesidad de recurrir a herramientas computacionales, por lo cual se recomienda su uso en las primeras fases del estudio de nuevos factores para futuras investigaciones.

- Aunque en este estudio se identificaron factores, que son de gran utilidad para la evaluación de la redundancia como factor de la resiliencia, es necesario continuar explorando fuentes de información para identificar otros posibles elementos adicionales.

- La metodología desarrollada puede llegar a ser utilizada como un modelo para la evaluación de amenazas que afecten los SUD en términos de calidad, con lo cual se podría identificar las mejores localizaciones para conseguir un menor impacto en las fuentes receptoras.

- El uso de bloques temáticos con relaciones de dependencia facilita la organización de los conceptos necesarios para desarrollar un modelo conceptual, sin embargo, el desarrollo de un modelo basado en relaciones de dependencia requiere de un mayor cuidado en los momentos que es alimentado con información externa, ya que la inclusión de datos errados propagara el error en cada bloque del sistema, dando lugar a conclusiones erradas.

- Es recomendable realizar una revisión de tecnologías disponibles que actúen sobre la perturbación en estudio antes de utilizar el modelo, ya que nuevas alternativas con mejores especificaciones pueden hacer la diferencia al momento de evaluar la redundancia.

- Los resultados obtenidos por medio del conjunto de funciones desarrolladas deben ser contrastados con un análisis económico y de disponibilidad de áreas para finalmente tomar la decisión más adecuada para el sistema de drenaje que se encuentre en estudio.

- Se recomienda el desarrollo de nuevos grupos de funciones para complementar las desarrolladas en el presente trabajo, relacionadas con otras metodologías para la generación de escenarios, la configuración de nuevas alternativas redundantes y el uso de diferentes alternativas en paralelo de forma automática.

9 BIBLIOGRAFÍA

Ahern, J. (2011) 'From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world', *Landscape and Urban Planning*, 100(4), pp. 341–343. doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.02.021.

Alvis, J. (2014) 'Integración de modelos en la optimización de un sistema de alerta temprana de calidad del agua.'

Anderies, J. *et al.* (2013) 'Aligning key concepts for global change policy: robustness, resilience, and sustainability.', *Ecology and society*. doi: dx.doi.org/10.5751/ES-05178-180208.

Ayyub, B. M. (2014) 'Systems resilience for multihazard environments: Definition, metrics, and valuation for decision making', *Risk Analysis*, 34(2), pp. 340–355. doi: 10.1111/risa.12093.

Balsells, M. *et al.* (2013) 'Analysing urban resilience through alternative stormwater management options: Application of the conceptual spatial decision support system model at the neighbourhood scale.', *Water science & technology*, pp. 2448–2457. doi: 10.2166/wst.2013.527.

Barahona, J. (2018) *Calibración de modelos de simulacion determinísticos en sistemas de drenaje urbano*. Universidad del Valle.

Blanco, S. A., Torres, L. P. and Galvis, C. A. (2017) 'Identificación de factores , variables e indicadores de resiliencia para la gestión sostenible de sistemas de drenaje urbano', 84(203), pp. 126–133.

De Bruijn, K. M. (2004) 'Resilience indicators for flood risk management systems of lowland rivers', *International Journal of River Basin Management*, 2(3), pp. 199–210. doi: 10.1080/15715124.2004.9635232.

De Bruijn, K. M. (2005) *Resilience and flood risk management, Aystems approach applied to lowland rivers, Delft Univ. Press Sci.* doi: ISBN: 90-407-2599-3.

Bruneau, M. *et al.* (2003) 'A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities', 19(4), pp. 733–752. doi: 10.1193/1.1623497.

Bruneau, M. and Reinhorn, A. (2007) 'Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities', *Earthquake Spectra*, 23(1), pp. 41–62. doi: 10.1193/1.2431396.

Butler, D. *et al.* (2014) 'A new approach to urban water management: Safe and sure', *Procedia Engineering*, 89, pp. 347–354. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.198.

Butler, D. *et al.* (2016) 'Reliable , resilient and sustainable water management : the Safe & SuRe approach', pp. 1–15. doi: 10.1002/gch2.1010.

Castrillón, Y. (2014) 'Estrategias para el control de inundaciones en la zona urbana de la cuenca del río Meléndez.' Cali, Colombia.

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., Saldarriaga, J. G., & Santos G., G. R. (1994) *Hidrología aplicada*.

Chow, V. *et al.* (1996) 'Applied Hydrology', p. 498.

CIACUA (2004) 'Aspectos generales y estado del arte sobre sistemas de alcantarillado.', *Proyecto realizado para catedra PAVCO*.

Cimellaro, G. P. *et al.* (2010) 'Framework for analytical quantification of disaster resilience', *Engineering Structures*, 32(11), pp. 3639–3649. doi: 10.1016/j.engstruct.2010.08.008.

Cimellaro, G. P. (2016) *Urban Resilience for Emergency Response and Recovery*. doi: 10.1007/978-3-319-30656-8.

Courty, L. *et al.* (2016) 'Computer floods simulation in mega-cities using a coupled drainage-surface flow model: Kolkata, India.' Kharagpur, India.

DAGMA (2010) 'Identificación de los responsables por vertimientos, captaciones de agua, riesgos y vulnerabilidad en el río Lilí, la quebrada Gualí y el Zanjón del Burro, en el área urbana de Santiago de Cali.'

DAGMA and INGEOMINAS (2005) 'Estudio de microzonificación sismica; de Santiago, de Cali.'

Delgado, A. and Pullido, S. (2005) 'Modelación hidrodinamica del sistema de drenaje urbano de la ciudad de Cali en el area de influencia del Río Cali.'

DESA (2009) 'World urbanization prospects'. Available at: http://www.ctc-health.org.cn/file/2011061610.pdf.

Duque, R. (2010) *Diagnóstico de los impactos de las escorrentías naturales y artificiales en la comuna 22*. Universidad del Valle.

EMCALI (2016) 'Catastro de redes de alcantarillado'.

Escalera, J. and Ruiz, E. (2011) 'Resiliencia socioecologica: aportaciones y retos desde la antropologia.', pp. 109–135.

FISRWG (2000) 'Stream corridor restoration: principles, processes, and practices.' Available at: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MEDIA/nrcs143_024824.jpg.

Francis, R. and Bekera, B. (2014) *A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems, Reliability Engineering and System Safety*. Elsevier. doi: 10.1016/j.ress.2013.07.004.

García, H. (2017) 'Proyecto: "La gestión integral del drenaje urbano como estrategia para minimizar el impacto de la contaminación de los recursos hídricos". Informe de resultados: Evaluación de estrategias de minimización. Caso de estudio: el sistema de drenaje sur de la c'.

García, P. *et al.* (2017) 'Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management. State of the art', *Water Research*, 115, pp. 149–161. doi: 10.1016/j.watres.2017.02.047.

Gómez, L. E. *et al.* (2014) 'Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización', *Dyna*, 81(184), pp. 158–163. doi: 10.15446/dyna.v81n184.37066.

GWP (2008) 'principios para la gestion integrada de los recursos hídricos, bases para el desarrollo de planes nacionales.'

GWP (2011) 'Situación de los recursos hídricos en Centroamérica. Hacia una gestion integrada.' Tegucigalpa, Honduras.

GWP (2013) 'Guía para la aplicacion de la gestion integrada del recuros hídrico (GIRH) a nivel municipal', I, p. 180.

Hallman, D. (1997) 'Ecumenical responses to climate change: a summary of the history and dynamics of ecumenical involvement in the issue of climate change.'

Hassler, U. and Kohler, N. (2014) 'Resilience in the built environment', *Building Research & Information*, 42(March 2015), pp. 119–129. doi: 10.1080/09613218.2014.873593.

Holling, C. S. (1973) 'Resilience and Stability of Ecological Systems', *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), pp. 1–23. doi: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.

Holling, C. S. (1996) 'Engineering resilience versus ecological resilience'. doi: In: ACADEMY, N. (ed.) Engineering within ecological constraints Washington, D. C.: P. Schulze.

Holling, C. S. (2000) 'Theories for sustainable futures'.

Hossein, N. and Mojtaba, M. (2017) 'Probabilistic quantification of community resilience using discrete event simulation', (June).

Hosseini, S., Barker, K. and Ramirez, J. E. (2016) 'A review of definitions and measures of system resilience', *Reliability Engineering and System Safety*, 145, pp. 47–61. doi:

10.1016/j.ress.2015.08.006.

Hwang, H., Lansey, K. and Quintanar, D. R. (2015) 'Resilience-based failure mode effects and criticality analysis for regional water supply system', *Journal of Hydroinformatics*, 17(2), pp. 193–210. doi: 10.2166/hydro.2014.111.

IFRC (2016) 'World disasters report: resilience saving lives today, investing for tomorrow.'

Ji, C. *et al.* (2016) 'Resilience of Energy Infrastructure and Services: Modeling, Data Analytics and Metrics', 105(7), pp. 1354–1366. doi: 10.1109/JPROC.2017.2698262.

Jiménez, E. A. (2012) *Una propuesta de sistema de drenaje sostenible para la cuenca baja del río Cañaveralejo*.

Klijn, F. and Marchand, M. (2000) 'Veerkracht een nieuw doel voor het waterbeheer?', pp. 31–44.

Li, J. *et al.* (2011) 'The study of overflow reduction strategies in urban drainage system'.

Marsalek, J. *et al.* (2013) 'Urban water cycle processes and interactions', *Urban water series UNESCO*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Mays, L. (2007) 'Water Resources Sustainability'. New York.

Mens, M. J. P. *et al.* (2011) 'The meaning of system robustness for flood risk management', *Environmental Science and Policy*. Elsevier Ltd, 14(8), pp. 1121–1131. doi: 10.1016/j.envsci.2011.08.003.

Mugume, S.N., Butler, D. (2015) 'Moving from reliability to resilience-based evaluation of urban drainage infrastructure: A case study of Kampala, Uganda'.

Mugume, S. N., Gomez, D. E., *et al.* (2015) 'A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems', *Water Research*. Elsevier Ltd, 81, pp. 15–26. doi: 10.1016/j.watres.2015.05.030.

Mugume, S. N., Diao, K., *et al.* (2015) 'Enhancing resilience in urban water systems for future cities', *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(6), pp. 1343–1352. doi: 10.2166/ws.2015.098.

Mugume, S. N. (2015) 'Modelling and Resilience-based Evaluation of Urban Drainage and Flood Management Systems for Future Cities', *College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences*, PhD, p. 231.

Novotny, E. (2008) 'A new paradigm of sustainable urban drainage and water management'.

Ouyang, M., Dueñas, L. and Min, X. (2012) 'A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems', *Structural Safety*, 36–37, pp. 23–31. doi:

10.1016/j.strusafe.2011.12.004.

Pandit, A. (2014) ‘Resilience of urban water systems: An “infrastructure ecology” approach to sustainable and resilient (SuRe) planning and design.’

Park, J. *et al.* (2013) ‘Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems’, *Risk Analysis*, 33(3), pp. 356–367. doi: 10.1111/j.1539-6924.2012.01885.x.

POMCA-LMC (2016) ‘Fase de diagnóstico y prospectiva. Reunión de socialización del consorcio ECOFOREST’.

Restrepo, J. (2016) ‘Soluciones para zonas inundables en Colombia’.

Riaño, B. G. A. (2016) *Cosimulación para el diseño de controladores en sistemas de drenaje urbano*. Universidad de los Andes.

Sanchez, A. T. (2013) *Modelling the future of water infrastructure of cities*.

Sharma, D. (2008) ‘Sustainable drainage system for stormwater management: a technological and policy intervention to combat diffuse pollution.’

Da Silva, J., Kernaghan, S. and Luque, A. (2012) ‘A systems approach to meeting the challenges of urban climate change’, *International Journal of Urban Sustainable Development*, 4(2), pp. 125–145. doi: 10.1080/19463138.2012.718279.

Da Silva, J. and Moench, M. (2014) ‘City Resilience Framework’, *Arup*, (November).

Tahmasebi, Y. and Yazdandoost, F. (2014) ‘A framework for evaluating the persistence of urban drainage risk management systems’, *Hydro-environment research*, pp. 330–342.

Tran, H. T. *et al.* (2016) ‘A framework for the quantitative assessment of performance-based system resilience’, *Reliability Engineering and System Safety*, 158, pp. 73–84. doi: 10.1016/j.ress.2016.10.014.

UICN (2007) ‘Diseñando un futuro sostenible’. Barcelona, España.

Ultramari, C. and Denis, R. (2007) ‘Urban resilience and slow motion disasters.’, *City & time*, p. 5.

UNFPA (2007) ‘Estado de la población mundial 2007: liberar el potencial del crecimiento urbano’. Available at: http://www.unfpa.org/sites/default/files/pub-pdf/swp2007_spa.pdf.

Vilches, A. *et al.* (2010) ‘La sostenibilidad como revolución cultural, tecnocientifica y politica’.

Villalobos, F. (2012) ‘Caracteristicas generales de los sistemas de alcantarillado’. Santiago

de nariño, Venezuela.

Walker, B. *et al.* (2002) ‘Resilience management in social-ecological systems’.

Walker, B. *et al.* (2004) ‘Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems’, *Ecology and society*, p. 9.

Wang, C. and Blackmore, J. M. (2009) ‘Resilience Concepts for Water Resource Systems’, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6), pp. 528–536. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:6(528).

Yazdani, A. *et al.* (2011) ‘Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach’, *Environmental Modelling and Software*. Elsevier Ltd, 26(12), pp. 1574–1582. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.07.016.

ANEXOS

ANEXO 1.
Bloque de detección (escenario de amenaza)

```
%% RESET
   fclose('all');
   clear;
   clc;

  % inicio del temporizador
   dti = datestr(now,'mmmm dd, yyyy HH:MM:SS
AM');
   fid = fopen('datei.txt','w');
   fprintf(fid,'%s \n',dti);
   dti =
textread('datei.txt','%s','delimiter','\n');

   %% INITIALIZE SWMM

   inp = 'L-B-2-00-N.inp';
   swmm = SWMM;

   % vector id de los nodos
   nodes = swmm.get_all(inp, swmm.NODE,
swmm.NONE);

   % vector id de las subcuencas
   subcatchs =
swmm.get_all(inp,swmm.SUBCATCH,swmm.NONE);

   %% RUNNING A SWMM SIMULATION

   %e: surface runoff, flow routing
   %d: duración de la simulación en segundos
   [e, d] = swmm.run_simulation(inp);

%% RETRIEVING INFORMATION

   % volumen generado por cada subcuenca
   [timeh,vinglps] =
swmm.read_results(subcatchs,swmm.SUBCATCH,swmm.R
UNOFF);

   % volumen (m3) generado por el sistema
   vingm = sum(vinglps')*0.3;

   % volumen en litros de inundación por nodo
   [timeh,vinulps] =
swmm.read_results(nodes,swmm.NODE,swmm.FLOODING)
;


   % volumen en (m3) de inundación por nodo
   vinumn = sum(vinulps)*0.3;

   % posiciones de nodos con inundación
   pos = find(vinumn>0);

   % nodos que presentan inundación
   nodesi = {};

   for k = 1:length(pos)
   nodesi{end+1} = nodes(pos(k));
   end

   % cambio de formato cell a string
   nod = string(nodesi);

   % escenarios
   E = [1:numel(nod)];

   % valores de inundación por nodo en (m3)
   vali = [];

   for k = 1:length(pos)
   vali(end+1) = vinumn(pos(k));
   end

   % volumen de inundación en el nodo critico
   vnc = max(vali);

   % duración de la inundación en cada nodo (h)
   dn = vinulps(:,pos)>0;
   dn = sum(dn)*5/60;
   dn = dn';

   % volumen (m3) de inundación del sistema
   vinum = sum(vinulps')*0.3;

   % volumen (m3) inundación en la simulación
   vinutm = sum(vinum);

   % (volumen inundación / volumen ingresa
   ctd = 1-(vinum'./vingm');

   % redundancia
   redundancia = 100-(((vinutm-
vnc)/vinutm)*100);

   % inundación final
   ir = vinutm-vnc;

   % distribución de volúmenes
   es = sort(vali,'descend');
   e01 = [es(1)];
   e02 = [(es(1)-es(2)),es(2)];
   e03 = [(e02(1)-es(3)),es(2:3)];
   e04 = [(e03(1)-es(4)),es(2:4)];
   e05 = [(e04(1)-es(5)),es(2:5)];
   e06 = [(e05(1)-es(6)),es(2:6)];
   e07 = [(e06(1)-es(7)),es(2:7)];
   e08 = [(e07(1)-es(8)),es(2:8)];
   e09 = [(e08(1)-es(9)),es(2:9)];
   e10 = [(e09(1)-es(10)),es(2:10)];
   e11 = [(e10(1)-es(11)),es(2:11)];
   e12 = [(e11(1)-es(12)),es(2:12)];
   e13 = [(e12(1)-es(13)),es(2:13)];
   e14 = [(e13(1)-es(14)),es(2:14)];
   e15 = [(e14(1)-es(15)),es(2:15)];
   e16 = [(e15(1)-es(16)),es(2:16)];
   e17 = [(e16(1)-es(17)),es(2:17)];
   e18 = [(e17(1)-es(18)),es(2:18)];
   e19 = [(e18(1)-es(19)),es(2:19)];
   e20 = [(e19(1)-es(20)),es(2:20)];

   % distribución temporal
   e21 = [es(14),es(6),(es(1)-es(14)-es(6))];

   %% RESULTS

   % localización de mínimos
   cdp = find(ctd<1);
   % vector de mínimos
   cdm = (ctd(ctd<1));
   %%%%%%%%%%%%%%%%%
   % resistencia (h)
   res = (cdp(1:1)-1)*(5/60);
   resp = 0;
   %%%%%%%%%%%%%%%%%
   % propagación (h)
   pro = (find(cdm==min(cdm)))*(5/60);
   prop = 0;
   %%%%%%%%%%%%%%%%%
   % recuperación (h)
   rec = ((numel(ctd(ctd<1)))-
(find(cdm==min(cdm))))*(5/60);
   recp = 0;
   %%%%%%%%%%%%%%%%%
   % flexibilidad (h)
```

```
    fle = (numel(ctd(ctd<1)))*(5/60);
    flep = 0;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % pérdida (%)
    per = (1-min(ctd))*100;
    perp = 0;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % rapidez (%/h) propagación
    rapi = per/pro;
    rapip = 0;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % rapidez (%/h) recuperación
    rap = per/rec;
    rapp = 0;
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%

    % final del temporizador
    dtf = datestr(now,'mmmm dd, yyyy HH:MM:SS
AM');
    fid = fopen('datef.txt','w');
    fprintf(fid,'%s \n',dtf);
    dtf =
textread('datef.txt','%s','delimiter','\n');

    %% RESET

    fclose('all');

%% EXPORT

    % hojas
    sheet1 = 1;
    sheet2 = 2;

    % encabezados hoja 2
    enca1 = {'Resultados evaluación de la
redundancia (Hoja 2 de 2)'};
    enca2 = {'Datos CTD'};
    enca3 = {'Tiempo (m)'};
    enca4 = {'Base'};
    enca5 = {'Inicio de simulaciones'};
    enca6 = {'Final de simulaciones'};
    enca7 = {'Pérdida (%)-(%)'};
    enca8 = {'Flexibilidad (h)-(%)'};
    enca9 = {'Rapidez (%/h)-(%)'};
    enca10 = {'Resistencia (h)-(%)'};
    enca11 = {'Propagación (h)-(%)'};
    enca12 = {'Recuperación (h)-(%)'};

    % encabezados hoja 1
    enca13 = {'Resultados evaluación de la
redundancia (Hoja 1 de 2)'};
    enca14 = {'Inicio de simulación'};
    enca15 = {'Final de simulación'};
    enca16 = {'Volumen de inundación base (m3)'};
    enca17 = {'Inundación total en el nodo
crítico (m3)'};
    enca18 = {'Redundancia si se trata el nodo
critico (%)'};
    enca19 = {'Inundación final si se trata el
nodo critico (m3)'};
    enca20 = {'Ubicación'};
    enca21 = {'Inundación (m3)'};
    enca22 = {'Escenario'};
    enca23 = {'D'};
    enca24 = {'Duración (h)'};

    % datos hoja 2
    xlswrite('data.xlsx',rapp,sheet2,'M7');
    xlswrite('data.xlsx',rap,sheet2,'L7');
    xlswrite('data.xlsx',resp,sheet2,'C7');
    xlswrite('data.xlsx',res,sheet2,'B7');
    xlswrite('data.xlsx',recp,sheet2,'K7');
    xlswrite('data.xlsx',rec,sheet2,'J7');
    xlswrite('data.xlsx',prop,sheet2,'G7');
    xlswrite('data.xlsx',pro,sheet2,'F7');
    xlswrite('data.xlsx',rapip,sheet2,'I7');
    xlswrite('data.xlsx',rapi,sheet2,'H7');
    xlswrite('data.xlsx',flep,sheet2,'O7');
    xlswrite('data.xlsx',fle,sheet2,'N7');
    xlswrite('data.xlsx',perp,sheet2,'E7');
    xlswrite('data.xlsx',per,sheet2,'D7');
    xlswrite('data.xlsx',E,sheet2,'S3');
    xlswrite('data.xlsx',E',sheet2,'A8');
    xlswrite('data.xlsx',timeh*60,sheet2,'Q4');
    xlswrite('data.xlsx',ctd,sheet2,'R4');
    xlswrite('data.xlsx',enca23,sheet2,'AM3');
    xlswrite('data.xlsx',enca23,sheet2,'A28');
    xlswrite('data.xlsx',enca22,sheet2,'A6');
    xlswrite('data.xlsx',enca22,sheet2,'R2');
    xlswrite('data.xlsx',enca12,sheet2,'J6');
    xlswrite('data.xlsx',enca11,sheet2,'F6');
    xlswrite('data.xlsx',enca10,sheet2,'B6');
    xlswrite('data.xlsx',enca9,sheet2,'L6');
    xlswrite('data.xlsx',enca9,sheet2,'H6');
    xlswrite('data.xlsx',enca8,sheet2,'N6');
    xlswrite('data.xlsx',enca7,sheet2,'D6');
    xlswrite('data.xlsx',enca6,sheet2,'A4');
    xlswrite('data.xlsx',enca5,sheet2,'A3');
    xlswrite('data.xlsx',enca4,sheet2,'A7');
    xlswrite('data.xlsx',enca4,sheet2,'R3');
    xlswrite('data.xlsx',enca3,sheet2,'Q3');
    xlswrite('data.xlsx',enca2,sheet2,'Q1');
    xlswrite('data.xlsx',enca1,sheet2);

    % datos hoja 1

    xlswrite('data.xlsx',dn,sheet1,'C12');
    xlswrite('data.xlsx',dtf,sheet1,'B4');
    xlswrite('data.xlsx',dti,sheet1,'B3');
    xlswrite('data.xlsx',e21',sheet1,'Z12');
    xlswrite('data.xlsx',e20',sheet1,'Y12');
    xlswrite('data.xlsx',e19',sheet1,'X12');
    xlswrite('data.xlsx',e18',sheet1,'W12');
    xlswrite('data.xlsx',e17',sheet1,'V12');
    xlswrite('data.xlsx',e16',sheet1,'U12');
    xlswrite('data.xlsx',e15',sheet1,'T12');
    xlswrite('data.xlsx',e14',sheet1,'S12');
    xlswrite('data.xlsx',e13',sheet1,'R12');
    xlswrite('data.xlsx',e12',sheet1,'Q12');
    xlswrite('data.xlsx',e11',sheet1,'P12');
    xlswrite('data.xlsx',e10',sheet1,'O12');
    xlswrite('data.xlsx',e09',sheet1,'N12');
    xlswrite('data.xlsx',e08',sheet1,'M12');
    xlswrite('data.xlsx',e07',sheet1,'L12');
    xlswrite('data.xlsx',e06',sheet1,'K12');
    xlswrite('data.xlsx',e05',sheet1,'J12');
    xlswrite('data.xlsx',e04',sheet1,'I12');
    xlswrite('data.xlsx',e03',sheet1,'H12');
    xlswrite('data.xlsx',e02',sheet1,'G12');
    xlswrite('data.xlsx',e01,sheet1,'F12');
xlswrite('data.xlsx',redundancia,sheet1,'C8');
    xlswrite('data.xlsx',vinutm,sheet1,'C6');
    xlswrite('data.xlsx',vali',sheet1,'B12');
    xlswrite('data.xlsx',nod',sheet1,'A12');
    xlswrite('data.xlsx',vnc,sheet1,'C7');
    xlswrite('data.xlsx',E,sheet1,'F11');
    xlswrite('data.xlsx',ir,sheet1,'C9');
    xlswrite('data.xlsx',enca24,sheet1,'C11');
    xlswrite('data.xlsx',enca23,sheet1,'Z11');
    xlswrite('data.xlsx',enca22,sheet1,'F10');
    xlswrite('data.xlsx',enca21,sheet1,'B11');
    xlswrite('data.xlsx',enca20,sheet1,'A11');
    xlswrite('data.xlsx',enca19,sheet1,'A9');
    xlswrite('data.xlsx',enca18,sheet1,'A8');
    xlswrite('data.xlsx',enca17,sheet1,'A7');
    xlswrite('data.xlsx',enca16,sheet1,'A6');
    xlswrite('data.xlsx',enca15,sheet1,'A4');
    xlswrite('data.xlsx',enca14,sheet1,'A3');
    xlswrite('data.xlsx',enca13,sheet1);

    %% SAVED AND RESET

    save 01-Det-N;
    fclose('all');
    disp('Detección concluida correctamente');
```

Bloque de ejecución (magnitud – un ciclo)

```
%% RESET

   fclose('all');
   clear;
   clc;

   % inicio del temporizador
   dti = datestr(now,'mmmm dd, yyyy HH:MM:SS
AM');
   fid = fopen('datei.txt','w');
   fprintf(fid,'%s \n',dti);
   dti =
textread('datei.txt','%s','delimiter','\n');

   %% INITIALIZE SWMM

   inp01 = 'L-B-2-01-M.inp';
   inp02 = 'L-B-2-02-M.inp';
   inp03 = 'L-B-2-03-M.inp';
   inp04 = 'L-B-2-04-M.inp';
   inp05 = 'L-B-2-05-M.inp';
   inp06 = 'L-B-2-06-M.inp';
   inp07 = 'L-B-2-07-M.inp';
   inp08 = 'L-B-2-08-M.inp';
   inp09 = 'L-B-2-09-M.inp';
   inp10 = 'L-B-2-10-M.inp';
   inp11 = 'L-B-2-11-M.inp';
   inp12 = 'L-B-2-12-M.inp';
   inp13 = 'L-B-2-13-M.inp';
   inp14 = 'L-B-2-14-M.inp';
   inp15 = 'L-B-2-15-M.inp';
   inp16 = 'L-B-2-16-M.inp';
   inp17 = 'L-B-2-17-M.inp';
   inp18 = 'L-B-2-18-M.inp';
   inp19 = 'L-B-2-19-M.inp';
   inp20 = 'L-B-2-20-M.inp';

   swmm = SWMM;
   load('DetN.mat')

   %%%%%%%%%%%%%%%%%

   % vector id de los nodos

   nodes = swmm.get_all(inp01, swmm.NODE,
swmm.NONE);

%% RUNNING A SWMM SIMULATION 01

   %e: surface runoff, flow routing
   %d: duración de la simulación en segundos

   [e, d] = swmm.run_simulation(inp01);

%% RETRIEVING INFORMATION

   % volumen de inundación por nodo

   [timeh,vinulps1] =
swmm.read_results(nodes,swmm.NODE,swmm.FLOODING)
;

   % volumen (m3) de inundación

   vinum1 = sum(vinulps1')*0.3;

   % volumen inundación / volumen ingresa

   ctd1 = 1-(vinum1'./vingm');

   %%%%%%%%%%%%%%%%%


%% RESULTS

   % localización de mínimos

   cdp1 = find(ctd1<1);

   % vector de mínimos

   cdm1 = (ctd1(ctd1<1));

   %%%%%%%%%%%%%%%%%

   % resistencia (h)

   res1 = (cdp1(1:1)-1)*(5/60);
   resp1 = (res1*100/res)-100;

   %%%%%%%%%%%%%%%%%

   % propagación (h)

   pro1 = (find(cdm1==min(cdm1)))*(5/60);
   prop1 = 100-(pro1*100/pro);

   %%%%%%%%%%%%%%%%%

   % recuperación (h)

   rec1 = ((numel(ctd1(ctd1<1)))-
(find(cdm1==min(cdm1))))*(5/60);
   recp1 = 100-(rec1*100/rec);

   %%%%%%%%%%%%%%%%%

   % flexibilidad (h)

   fle1 = (numel(ctd1(ctd1<1)))*(5/60);
   flep1 = 100-(fle1*100/fle);

   %%%%%%%%%%%%%%%%%

   % pérdida (%)

   per1 = (1-min(ctd1))*100;
   perp1 = 100-(per1*100/per);

   %%%%%%%%%%%%%%%%%

   % rapidez (%/h) propagación
   rapi1 = per1/pro1;
   rapip1 = 100-(rapi1*100/rapi);

   %%%%%%%%%%%%%%%%%

   % rapidez (%/h) recuperación
   rap1 = per1/rec1;
   rapp1 = (rap1*100/rap)-100;

   %%%%%%%%%%%%%%%%%

%% RESET

   fclose('all');

%% COMPILER

   % curvas de desempeño

   ctdt =
[ctd1,ctd2,ctd3,ctd4,ctd5,ctd6,ctd7,ctd8,ctd9,ct
d10,ctd11,ctd12,ctd13,ctd14,ctd15,ctd16,ctd17,ct
d18,ctd19,ctd20];
```

```
   % resistencia (h)

   rest =
[res1,res2,res3,res4,res5,res6,res7,res8,res9,re
s10,res11,res12,res13,res14,res15,res16,res17,re
s18,res19,res20];

   % resistencia (%)

   respt =
[resp1,resp2,resp3,resp4,resp5,resp6,resp7,resp8
,resp9,resp10,resp11,resp12,resp13,resp14,resp15
,resp16,resp17,resp18,resp19,resp20];

   % propagación (h)

   prot =
[pro1,pro2,pro3,pro4,pro5,pro6,pro7,pro8,pro9,pr
o10,pro11,pro12,pro13,pro14,pro15,pro16,pro17,pr
o18,pro19,pro20];

   % propagación (%)

   propt =
[prop1,prop2,prop3,prop4,prop5,prop6,prop7,prop8
,prop9,prop10,prop11,prop12,prop13,prop14,prop15
,prop16,prop17,prop18,prop19,prop20];

   % recuperación (h)

   rect =
[rec1,rec2,rec3,rec4,rec5,rec6,rec7,rec8,rec9,re
c10,rec11,rec12,rec13,rec14,rec15,rec16,rec17,re
c18,rec19,rec20];

   % recuperación (%)

   recpt =
[recp1,recp2,recp3,recp4,recp5,recp6,recp7,recp8
,recp9,recp10,recp11,recp12,recp13,recp14,recp15
,recp16,recp17,recp18,recp19,recp20];

   % flexibilidad (h)

   flet =
[fle1,fle2,fle3,fle4,fle5,fle6,fle7,fle8,fle9,fl
e10,fle11,fle12,fle13,fle14,fle15,fle16,fle17,fl
e18,fle19,fle20];

   % flexibilidad (%)

   flept =
[flep1,flep2,flep3,flep4,flep5,flep6,flep7,flep8
,flep9,flep10,flep11,flep12,flep13,flep14,flep15
,flep16,flep17,flep18,flep19,flep20];

   % pérdida (%1)

   pert =
[per1,per2,per3,per4,per5,per6,per7,per8,per9,pe
r10,per11,per12,per13,per14,per15,per16,per17,pe
r18,per19,per20];

   % pérdida (%2)

   perpt =
[perp1,perp2,perp3,perp4,perp5,perp6,perp7,perp8
,perp9,perp10,perp11,perp12,perp13,perp14,perp15
,perp16,perp17,perp18,perp19,perp20];

   % rapidez (h) recuperación

   rapt =
[rap1,rap2,rap3,rap4,rap5,rap6,rap7,rap8,rap9,ra
p10,rap11,rap12,rap13,rap14,rap15,rap16,rap17,ra
p18,rap19,rap20];

   % rapidez (h) propagación

   rapit =
[rapi1,rapi2,rapi3,rapi4,rapi5,rapi6,rapi7,rapi8
,rapi9,rapi10,rapi11,rapi12,rapi13,rapi14,rapi15
,rapi16,rapi17,rapi18,rapi19,rapi20];

   % rapidez (%) recuperación

   rappt =
[rapp1,rapp2,rapp3,rapp4,rapp5,rapp6,rapp7,rapp8
,rapp9,rapp10,rapp11,rapp12,rapp13,rapp14,rapp15
,rapp16,rapp17,rapp18,rapp19,rapp20];

   % rapidez (%) propagación

   rapipt =
[rapip1,rapip2,rapip3,rapip4,rapip5,rapip6,rapip
7,rapip8,rapip9,rapip10,rapip11,rapip12,rapip13,
rapip14,rapip15,rapip16,rapip17,rapip18,rapip19,
rapip20];

   %% final del temporizador

   dtf = datestr(now,'mmmm dd, yyyy HH:MM:SS
AM');
   fid = fopen('datef.txt','w');
   fprintf(fid,'%s \n',dtf);
   dtf =
textread('datef.txt','%s','delimiter','\n');

%% EXPORT

   % datos hoja 2

   xlswrite('data.xlsx',rapipt',sheet2,'I8');
   xlswrite('data.xlsx',rapit',sheet2,'H8');
   xlswrite('data.xlsx',rappt',sheet2,'M8');
   xlswrite('data.xlsx',rapt',sheet2,'L8');
   xlswrite('data.xlsx',perpt',sheet2,'E8');
   xlswrite('data.xlsx',pert',sheet2,'D8');
   xlswrite('data.xlsx',flept',sheet2,'O8');
   xlswrite('data.xlsx',flet',sheet2,'N8');
   xlswrite('data.xlsx',recpt',sheet2,'K8');
   xlswrite('data.xlsx',rect',sheet2,'J8');
   xlswrite('data.xlsx',propt',sheet2,'G8');
   xlswrite('data.xlsx',prot',sheet2,'F8');
   xlswrite('data.xlsx',respt',sheet2,'C8');
   xlswrite('data.xlsx',rest',sheet2,'B8');
   xlswrite('data.xlsx',ctdt,sheet2,'S4');
   xlswrite('data.xlsx',dtf,sheet2,'B4');
   xlswrite('data.xlsx',dti,sheet2,'B3');
   xlswrite('data.xlsx',enca1,sheet2);
   xlswrite('data.xlsx',enca13,sheet1);

   %% SAVED AND RESET

   save 02-Eje-M;
   fclose('all');
   disp('Evaluación concluida correctamente');

   %%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Bloque de ejecución (duración – un ciclo)

```
%% RESET

   fclose('all');
   clear;
   clc;

   %% INITIALIZE SWMM

   inpi = 'L-B-2-03-D.inp';

   swmm = SWMM;
   load('DetN.mat')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%

 % vector id de los nodos

   nodes = swmm.get_all(inpi, swmm.NODE,
swmm.NONE);

%% RUNNING A SWMM SIMULATION 01

   %e: surface runoff, flow routing
   %d: duración de la simulación en segundos

   [e, d] = swmm.run_simulation(inpi);

%% RETRIEVING INFORMATION

   % volumen de inundación por nodo

   [timeh,vinulpsi] =
swmm.read_results(nodes,swmm.NODE,swmm.FLOODING)
;

   % volumen (m3) de inundación del sistema

   vinumi = sum(vinulpsi')*0.3;

   % volumen inundación / volumen ingresa

   ctdi = 1-(vinumi'./vingm');

%% RESULTS

   % localización de mínimos

   cdpi = find(ctdi<1);

   % vector de mínimos

   cdmi = (ctdi(ctdi<1));

   %%%%%%%%%%%%%%%%%%

   % resistencia (h)

   resi = (cdpi(1:1)-1)*(5/60);
   respi = (resi*100/res)-100;

   %%%%%%%%%%%%%%%%%%

   % propagación (h)

   proi = (find(cdmi==min(cdmi)))*(5/60);
   propi = 100-(proi*100/pro);

   %%%%%%%%%%%%%%%%%%

   % recuperación (h)

   reci = ((numel(ctdi(ctdi<1)))-
(find(cdmi==min(cdmi))))*(5/60);
   recpi = 100-(reci*100/rec);

   %%%%%%%%%%%%%%%%%%

   % flexibilidad (h)

   flei = (numel(ctdi(ctdi<1)))*(5/60);
   flepi = 100-(flei*100/fle);

   %%%%%%%%%%%%%%%%%%

   % pérdida (%)

   peri = (1-min(ctdi))*100;
   perpi = 100-(peri*100/per);

   % rapidez (%/h) propagación

   rapi0 = peri/proi;
   rappi0 = 100-(rapi0*100/rapi);

   %%%%%%%%%%%%%%%%%%

   % rapidez (%/h) recuperación

   rapiz = peri/reci;
   rappiz = (rapiz*100/rap)-100;

%% EXPORT

   % datos hoja 2

   xlswrite('data.xlsx',resi,sheet2,'B28');
   xlswrite('data.xlsx',respi,sheet2,'C28');
   xlswrite('data.xlsx',proi,sheet2,'F28');
   xlswrite('data.xlsx',propi,sheet2,'G28');
   xlswrite('data.xlsx',reci,sheet2,'J28');
   xlswrite('data.xlsx',recpi,sheet2,'K28');
   xlswrite('data.xlsx',flei,sheet2,'N28');
   xlswrite('data.xlsx',flepi,sheet2,'O28');
   xlswrite('data.xlsx',peri,sheet2,'D28');
   xlswrite('data.xlsx',perpi,sheet2,'E28');
   xlswrite('data.xlsx',rapi0,sheet2,'H28');
   xlswrite('data.xlsx',rappi0,sheet2,'I28');
   xlswrite('data.xlsx',rapiz,sheet2,'L28');
   xlswrite('data.xlsx',rappiz,sheet2,'M28');
   xlswrite('data.xlsx',ctdi,sheet2,'AM4');
   xlswrite('data.xlsx',enca1,sheet2);
   xlswrite('data.xlsx',enca13,sheet1);

   %% SAVED AND RESET

   save EjeD;
   fclose('all');
   disp('Escenario concluido correctamente');

   %%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

ANEXO 2. Configuración de escenarios (distribución del volumen redundante).

	Escenario										
Ubicación	**A**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
ND758	0.00	17302.61	15656.27	14064.09	12627.62	11442.28	10282.05	9389.48	8557.31	8123.64	7760.18
ND655	0.00	0.00	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34
ND284	0.00	0.00	0.00	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18
ND286	0.00	0.00	0.00	0.00	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46
ND288	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34
ND759	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1160.24	1160.24	1160.24	1160.24	1160.24
ND496	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	892.57	892.57	892.57	892.57
ND225	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	832.16	832.16	832.16
ND227	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	433.67	433.67
ND290	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	363.46
ND243	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ND213	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ND237	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ND760	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ND298	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ND291	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ND242	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ND244	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ND292	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ND299	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

	Escenario										
Ubicación	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**D**
ND758	7413.97	7109.62	6888.35	6674.34	6513.97	6394.25	6311.07	6244.79	6194.17	6173.72	214.01
ND655	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1646.34	1160.24
ND284	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	1592.18	15928.36
ND286	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	1436.46	0.00
ND288	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34	1185.34	0.00
ND759	1160.24	1160.24	1160.24	1160.24	1160.24	1160.24	1160.24	1160.24	1160.24	1160.24	0.00
ND496	892.57	892.57	892.57	892.57	892.57	892.57	892.57	892.57	892.57	892.57	0.00
ND225	832.16	832.16	832.16	832.16	832.16	832.16	832.16	832.16	832.16	832.16	0.00
ND227	433.67	433.67	433.67	433.67	433.67	433.67	433.67	433.67	433.67	433.67	0.00
ND290	363.46	363.46	363.46	363.46	363.46	363.46	363.46	363.46	363.46	363.46	0.00
ND243	346.22	346.22	346.22	346.22	346.22	346.22	346.22	346.22	346.22	346.22	0.00
ND213	0.00	304.35	304.35	304.35	304.35	304.35	304.35	304.35	304.35	304.35	0.00
ND237	0.00	0.00	221.26	221.26	221.26	221.26	221.26	221.26	221.26	221.26	0.00
ND760	0.00	0.00	0.00	214.01	214.01	214.01	214.01	214.01	214.01	214.01	0.00
ND298	0.00	0.00	0.00	0.00	160.37	160.37	160.37	160.37	160.37	160.37	0.00
ND291	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	119.73	119.73	119.73	119.73	119.73	0.00
ND242	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	83.18	83.18	83.18	83.18	0.00
ND244	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	66.28	66.28	66.28	0.00
ND292	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.62	50.62	0.00
ND299	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.46	0.00

ANEXO 3. Valores de la aplicación de la función de desempeño.

Tiempo	Escenario										
(h)	A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.33	0.96	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.42	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.50	0.91	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.58	0.84	0.90	0.91	0.93	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93
0.67	0.84	0.91	0.89	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93
0.75	0.86	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
0.83	0.89	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.95	0.94
0.92	0.91	0.97	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95
1.00	0.92	0.98	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96
1.08	0.93	0.99	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96
1.17	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97
1.25	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97
1.33	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98
1.42	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98
1.50	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99
1.58	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
1.67	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.75	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.83	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.92	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.00	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.08	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.17	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.25	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.33	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.42	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.50	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.58	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.67	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.75	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.83	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.92	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

3.00	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.08	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.17	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.25	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.33	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.42	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.50	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.58	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.67	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.75	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.83	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.92	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.42	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.58	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.67	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tiempo	Escenario										
(h)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	D
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.42	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.50	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.98
0.58	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.90
0.67	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.88
0.75	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.92
0.83	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.95
0.92	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.97
1.00	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.98
1.08	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.99
1.17	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	1.00
1.25	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	1.00
1.33	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	1.00
1.42	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	1.00
1.50	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	1.00
1.58	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
1.67	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
1.75	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
1.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.42	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.58	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.67	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

3.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.42	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.58	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.67	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.42	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.58	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.67	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

ANEXO 4. Valores de los factores descriptores de la redundancia.

	Resistencia		Pérdida		Propagación		Rapidez		Recuperación		Rapidez		Flexibilidad	
Escenario	**(h)**	**(%)**	**(%)**	**(%)**	**(h)**	**(%)**	**(%/h)**	**(%)**	**(h)**	**(%)**	**(%/h)**	**(%)**	**(h)**	**(%)**
Amenaza	0.33	0.00	16.44	0.00	0.33	0.00	49.31	0.00	4.08	0.00	4.03	0.00	4.42	0.00
1	0.33	0.00	9.85	40.08	0.33	0.00	29.55	40.08	4.08	0.00	2.41	-40.08	4.42	0.00
2	0.33	0.00	10.85	34.00	0.42	-25.00	26.04	47.20	4.00	2.04	2.71	-32.62	4.42	0.00
3	0.33	0.00	10.41	36.66	0.42	-25.00	24.99	49.33	4.00	2.04	2.60	-35.34	4.42	0.00
4	0.33	0.00	9.49	42.25	0.33	0.00	28.48	42.25	4.08	0.00	2.32	-42.25	4.42	0.00
5	0.33	0.00	9.02	45.10	0.42	-25.00	21.66	56.08	4.00	2.04	2.26	-43.96	4.42	0.00
6	0.33	0.00	9.42	42.69	0.42	-25.00	22.61	54.15	4.00	2.04	2.36	-41.50	4.42	0.00
7	0.33	0.00	8.83	46.27	0.42	-25.00	21.20	57.01	4.00	2.04	2.21	-45.15	4.42	0.00
8	0.33	0.00	8.08	50.87	0.42	25.00	19.38	60.70	4.00	2.04	2.02	-49.85	4.42	0.00
9	0.33	0.00	7.78	52.65	0.42	-25.00	18.68	62.12	4.00	2.04	1.95	-51.67	4.42	0.00
10	0.33	0.00	7.44	54.74	0.42	-25.00	17.86	63.79	4.00	2.04	1.86	-53.79	4.42	0.00
11	0.33	0.00	7.04	57.16	0.42	-25.00	16.90	65.73	4.00	2.04	1.76	-43.73	4.42	0.00
12	0.33	0.00	6.84	58.40	0.42	-25.00	16.41	66.72	4.00	2.04	1.71	-57.54	4.42	0.00
13	0.33	0.00	6.61	59.80	0.42	-25.00	15.86	67.84	4.00	2.04	1.65	-58.96	4.42	0.00
14	0.50	50.00	6.65	59.57	0.25	25.00	26.58	46.10	1.17	71.43	5.70	41.49	1.42	67.92
15	0.50	50.00	6.48	60.60	0.25	25.00	25.91	47.46	1.25	69.39	5.18	28.72	1.50	66.04
16	0.50	50.00	6.40	61.08	0.25	25.00	25.59	48.11	1.25	69.39	5.12	27.14	1.50	66.04
17	0.50	50.00	6.31	61.63	0.25	25.00	25.23	48.85	1.25	69.39	5.05	25.33	1.50	66.04
18	0.50	50.00	6.24	62.01	0.25	25.00	24.98	49.35	1.33	67.35	4.68	16.33	1.58	64.15
19	0.50	50.00	6.17	62.49	0.25	25.00	24.67	49.98	1.33	67.35	4.62	14.88	1.58	64.15
20	0.50	50.00	6.15	62.59	0.25	25.00	24.60	50.13	1.33	67.35	4.61	14.56	1.58	64.15
D	0.50	50.00	11.50	30.01	0.25	25.00	46.02	6.69	0.50	87.76	23.01	471.55	0.75	83.02

ANEXO 5. Duraciones de inundación por nodo en horas.

	Escenario																					
Ubicación	**A**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**D**
ND213	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
ND225	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
ND227	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
ND237	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
ND242	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
ND243	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
ND244	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
ND284	0.7	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
ND286	0.7	0.7	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
ND288	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
ND290	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
ND291	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
ND292	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2
ND298	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
ND299	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.3
ND496	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
ND655	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
ND758	3.4	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	0.3
ND759	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ND760	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$\overline{X}$	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
%	0.0	18	20	23	26	29	50	52	53	55	56	57	61	62	85	86	88	89	89	90	92	62