

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA



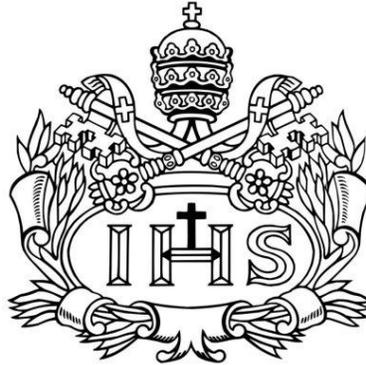
**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE INUNDACIÓN
PLUVIAL DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO EN LA
SUBCUENCA EL SALITRE DE BOGOTÁ**

TRABAJO DE GRADO

Laura Giovanna Santos Santos, Eduardo Jesús Ariza Pallares

**Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil
Bogotá, D.C.
2014**

**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE INUNDACIÓN
PLUVIAL DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO EN LA
SUBCUENCA EL SALITRE DE BOGOTÁ**



**LAURA GIOVANNA SANTOS SANTOS
EDUARDO JESÚS ARIZA PALLARES**

**Trabajo presentado para la obtención de título de Ingeniería
Civil.**

**ANDRÉS TORRES
(IC, MSc, PhD)
Director**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D.C.
2014**

REGLAMENTO DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

Art. 23 de la resolución No. 13 del 6 de julio de 1964

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque las tesis no contengan ataques o polémicas puramente personales; antes bien; se ve en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

Bogotá, 16 de junio de 2014

Señores

BIBLIOTECA GENERAL
Pontificia Universidad Javeriana

Estimados señores,

Autorizo a los usuarios interesados, consultar y reproducir parcialmente el contenido del trabajo de grado titulado "*Análisis de confiabilidad de inundación pluvial del sistema de alcantarillado en la subcuenca el Salitre de Bogotá*", presentado por los estudiantes Laura Santos Santos y Eduardo Jesús Ariza Pallares como requisito para optar al título de Ingeniero Civil en el año 2014, siempre que mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a sus autores.

Atentamente,

EDUARDO JESÚS ARIZA
PALLARES
C.C. 1140846258

LAURA GIOVANNA SANTOS
SANTOS
C.C. 1018434941

Dedicatoria

“A mis padres, quienes han sido mi guía, mi motivación y mi constante apoyo.

A mi familia y a mi novio, que han estado presentes en esta etapa de mi vida y que sé, seguirán a mi lado de forma incondicional en el camino por recorrer. Quiero dedicarles este logro de corazón.”

Laura Giovanna Santos

“Quiero dedicar este trabajo de grado a toda mi familia, incluyendo a mi hermana Nazly, mi papá Mario, mi tío Etel, mis primos Laura y Etel y en especial a la persona más maravillosa que tengo en mi vida, a mi mamá Eny Estela. Muchas gracias mami por todo el esfuerzo, por los años y la distancia que nos separaron y que soportaste fuertemente, por tu voz de aliento en mis momentos difíciles, por el sacrificio emocional, por tu apoyo incondicional y por siempre creer en mí. Esta tesis te la dedico a ti mi madre linda. ¡Te amo mamita hermosa!”

Eduardo Ariza Pallares

Agradecimientos

Debemos agradecer especialmente al Ingeniero Andrés Eduardo Torres por ser un excelente guía durante el desarrollo de este proyecto, por su apoyo y dedicación.

Agradecemos a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá por la información suministrada bajo el Convenio Interinstitucional de Cooperación para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (Convenio n. 9-07-26100-1060-2008), celebrado entre la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y la Pontificia Universidad Javeriana.

Igualmente agradecemos a los ingenieros del área de diseño de la empresa Ingeniería e Hidrosistemas Grupo Consultoría (IEH GRUCON) por las asesorías y el suministro de computadores para la realización de este trabajo de grado.

Finalmente agradecemos a la facultad de ingeniería de sistemas por amabilidad y por el suministro de computadores para la realización de este trabajo de grado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	11
2	MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1	Zona de estudio	13
2.2	Información existente de la zona de estudio	16
2.3	Herramientas Computacionales	17
2.3.1	ArcGIS	17
2.3.2	Programa R	18
2.3.3	Programa SewerGEMS	19
2.3.4	Programa EPA-SWMM	19
2.4	Modelación Hidrológica	22
2.5	Modelación Hidráulica	30
2.5.1	Lectura de datos (Ver Anexo 1):	30
2.5.2	Cálculos y/o consideraciones (Ver Anexo 1):	31
2.5.3	Simulaciones (Ver Anexo 1):	32
2.6	Análisis de Resultados Hidráulicos	35
2.7	Análisis de Resultados Hidrológicos	42
3	RESULTADOS	44
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
5	BIBLIOGRAFÍA	58
6	LISTA DE ANEXOS	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Funciones de R utilizadas en el proyecto	18
Tabla 2. Rangos de periodo de retorno hidráulico según categoría. Fuente: Presentación propia de los autores	40
Tabla 3. Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis	48

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Distribución espacial de las redes de alcantarillado pluvial de las subcuencas pertenecientes a la cuenca El Salitre. Fuente: Presentación propia de los autores	14
Ilustración 2. Red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre. Fuente: presentación propia de los autores	15
Ilustración 3. Subcuenca El Salitre. Fuente: Universidad Militar Nueva Granada. (2010). POMCA Salitre, convenio SDA – UMNG.	16
Ilustración 4. Representación del modelo conceptual de Pozo-Tubería en EPA-SWMM. Tomado de Murcia Balaguer.	21
Ilustración 5. Subcuenca El Salitre con las estaciones pluviométricas aferentes. Fuente: Presentación propia de los autores	24
Ilustración 6. Polígonos de Thiessen para los pozos de inspección de la red de alcantarillado de la subcuenca El Salitre. Fuente: Presentación propia de los autores	25
Ilustración 7. Modelo de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre con áreas aferentes a los pozos de inspección asignadas en SewerGEMS. Fuente: Presentación propia de los autores	27
Ilustración 8. Modelo de la red de alcantarillado pluvial de la Subcuenca El Salitre en EPASWMM. Fuente: Presentación propia de los autores.....	28
Ilustración 9. Interacción entre ArcGIS, SewerGEMS y EPA-SWMM. Fuente: presentación propia de los autores	29
Ilustración 10. Interacción entre EPASWMM-R-EPASWMM. Fuente: Presentación propia de los autores	34
Ilustración 11. Interacción entre EPASWMM-R. Fuente: Presentación propia de los autores.....	37

Ilustración 12. Proceso de análisis de variables influyentes en la probabilidad de inundación. Fuente: Presentación propia de los autores	42
Ilustración 12. Probabilidad de inundación de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre. Fuente: Presentación propia de los autores.....	44
Ilustración 13. Periodos de retorno hidráulicos de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre. Fuente: Presentación propia de los autores	46
Ilustración 14. Diagrama de cajas de probabilidad de inundación para los rangos de diámetro. Fuente: Presentación propia de los autores.....	49
Ilustración 15. Diagrama de cajas de probabilidad de inundación para los rangos de coeficiente de rugosidad de Manning. Fuente: Presentación propia de los autores.....	50
Ilustración 16. Diagrama de cajas de probabilidad de inundación para los rangos de pendientes. Fuente: Presentación propia de los autores	51
Ilustración 17. Diagrama de cajas de probabilidad de inundación para los rangos de coeficiente de escorrentía. Fuente: Presentación propia de los autores.....	52
Ilustración 18. Periodo de retorno hidrológico contra periodo de retorno hidráulico. Fuente: Presentación propia de los autores	53

1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá se ha visto afectada de forma reiterada en las épocas de invierno por inundaciones. Estas situaciones obedecen a la excedencia de la capacidad hidráulica de cada tubería por la carga hidrológica y a la interacción ciudad/río, a la capacidad de las cuencas, a la absorción de las mismas por el crecimiento desbordado de la ciudad, al cambio climático y a grandes volúmenes de escorrentía que aumentan con el pasar del tiempo debido a la creciente impermeabilización de nuevas zonas como producto del desarrollo constructivo de la ciudad y que van a parar a los sistemas de alcantarillado pluvial (Park, 2014).

Durante la última década se han realizado diferentes estudios que han contribuido a evaluar el comportamiento de la subcuenca El Salitre de Bogotá. En estos estudios se ha evaluado la respuesta hidrológica de la subcuenca teniendo en cuenta parámetros y variables hidrológicas con incertidumbres elevadas (Zapata et al., 2011). Se han usado las curvas IDF (Sandoval et al., 2012) (Torres et al., 2013), las cuales reportan intensidades máximas para diferentes periodos de retorno y tiempos de concentración: estas curvas se han utilizado tradicionalmente para el diseño de sistemas hidráulicos, al relacionar dicha intensidad máxima con el caudal máximo utilizado para el diseño. Sin embargo, estas curvas no son adaptadas para el análisis del comportamiento hidráulico de los sistemas de alcantarillado como respuesta a series de lluvias reales (Brodie, 2013), debido a que en este caso no interesa únicamente la intensidad máxima de un evento aislado, sino series de lluvias con diferentes intensidades (posiblemente inferiores a la máxima). Adicionalmente, en algunos estudios se ha supuesto lluvia uniforme sobre toda la subcuenca (Sandoval et al., 2013), simplificación que puede presentar errores elevados, debido a la heterogeneidad de la lluvia reportada en diferentes estudios en Bogotá.

De la misma manera se ha evaluado la respuesta hidráulica de la red de alcantarillado en la subcuenca mediante las ecuaciones de flujo uniforme (Sandoval et al., 2011), simplificación que en algunos casos puede ocasionar errores importantes. En otras ocasiones no se ha tenido en

cuenta la capacidad hidráulica de la red de alcantarillado para el análisis de la confiabilidad de inundación (Brodie, 2013).

Por lo anterior se considera que es necesario retomar elementos de estas investigaciones y proponer realizar un estudio que permita conocer unas condiciones más próximas a la realidad para evaluar la confiabilidad de inundación (R. Ashley et al., 2007) del alcantarillado pluvial de la cuenca El Salitre de Bogotá. Con dicho análisis se pretende obtener resultados de confiabilidad de inundación disminuyendo los errores en estos. Los aportes específicos consistirán en: (i) utilizar series prolongadas de lluvias reales de un año y con una resolución horaria en vez de usar curvas IDF; (ii) evaluar la carga hidrológica con el software EPA-SWWM; (iii) evaluar la carga hidráulica mediante ecuaciones de flujo variado en vez de flujo uniforme. De esta manera se puede reportar la confiabilidad de inundación del sistema de alrededor de 1970 tuberías pluviales y combinadas para distintos periodos de retorno, aumentando la precisión de los resultados con respecto a estudios previamente realizados.

El presente trabajo tiene por objetivo estimar la confiabilidad de inundación pluvial del sistema de alcantarillado en la subcuenca El Salitre de Bogotá partiendo de la evaluación de cargas hidrológicas e hidráulicas sobre la subcuenca El Salitre teniendo en cuenta la variabilidad en los parámetros y las variables hidrológicas e hidráulicas.

Este documento contiene diferentes capítulos. El segundo capítulo hace referencia a los materiales y métodos implementados para el desarrollo de la presente investigación. En este se encuentra información existente sobre la zona de estudio que sirvió como punto de partida para este trabajo de grado. Asimismo contiene las herramientas computacionales utilizadas para el desarrollo del mismo. Además contiene la metodología para realizar las modelaciones hidrológicas e hidráulicas y para el análisis de resultados. Posteriormente se encuentra el tercer capítulo, el cual contiene los resultados arrojados por la investigación. Luego sigue el cuarto capítulo que contiene las conclusiones a las que se llega con el trabajo de grado, así como las recomendaciones realizadas. Por último se tiene el capítulo de la bibliografía que sirvió como referencia para efectuar esta investigación.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se hace referencia a los materiales, programas y datos utilizados para el desarrollo de este trabajo de grado así como la descripción de las metodologías desarrolladas para alcanzar el objetivo del mismo.

2.1 Zona de estudio

La zona seleccionada para el desarrollo de esta investigación es la subcuenca El Salitre en la ciudad de Bogotá, D.C., considerada como una zona crítica según investigaciones anteriormente llevadas a cabo (Sandoval et al, 2010).

La cuenca del Río Salitre pertenece a la cuenca media del Río Bogotá, ubicada en el sector centro-norte de la ciudad de Bogotá. Está conformada por 14 subcuencas: Bonanza, Chico Norte, Colsubsidio, Juan Amarillo, Las Delicias, La Vieja, Los Pinos, Río Negro, Río Nuevo, El Salitre, San Marcos, Subcuenca 59, Tabora y Río Bogotá; las cuales confluyen aguas abajo del Río Chicú después de recorrer un área aproximada de 13250 hectáreas, según el documento POMCA Salitre (Universidad Militar Nueva Granada, 2010).

La zona de estudio definida como la subcuenca El Salitre de Bogotá limita al noroccidente con la subcuenca Bonanza, al suroriente con la subcuenca las Delicias, al oriente con las subcuencas Rionegro y Subcuenca 59, al oeste con la subcuenca Río Nuevo (Ilustración 1).

La subcuenca El Salitre tiene un área aproximada de 670 hectáreas y está compuesta por un sistema de alcantarillado combinado en su mayor parte. Cuenta con 1970 tuberías, con diámetros promedio de 50 centímetros que van desde 10 centímetros hasta 1.2 metros y unas longitudes promedio de 63 metros que van desde 1.8 metros hasta 200 metros (Ilustración 2). En la Ilustración 3 se puede observar una fotografía en una de las zonas comprendidas en la subcuenca.

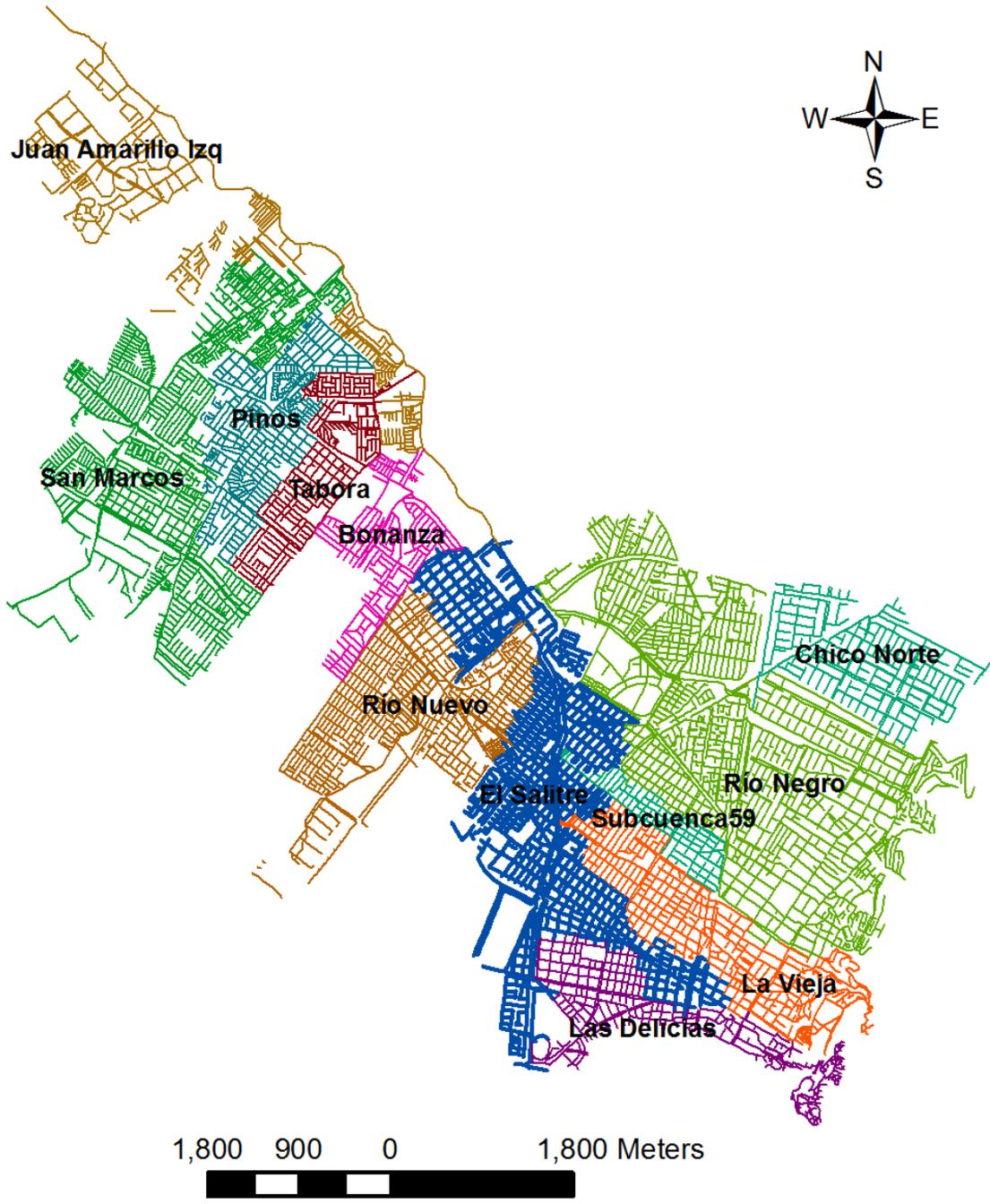


Ilustración 1. Distribución espacial de las redes de alcantarillado pluvial de las subcuencas pertenecientes a la cuenca El Salitre. Fuente: Presentación propia de los autores

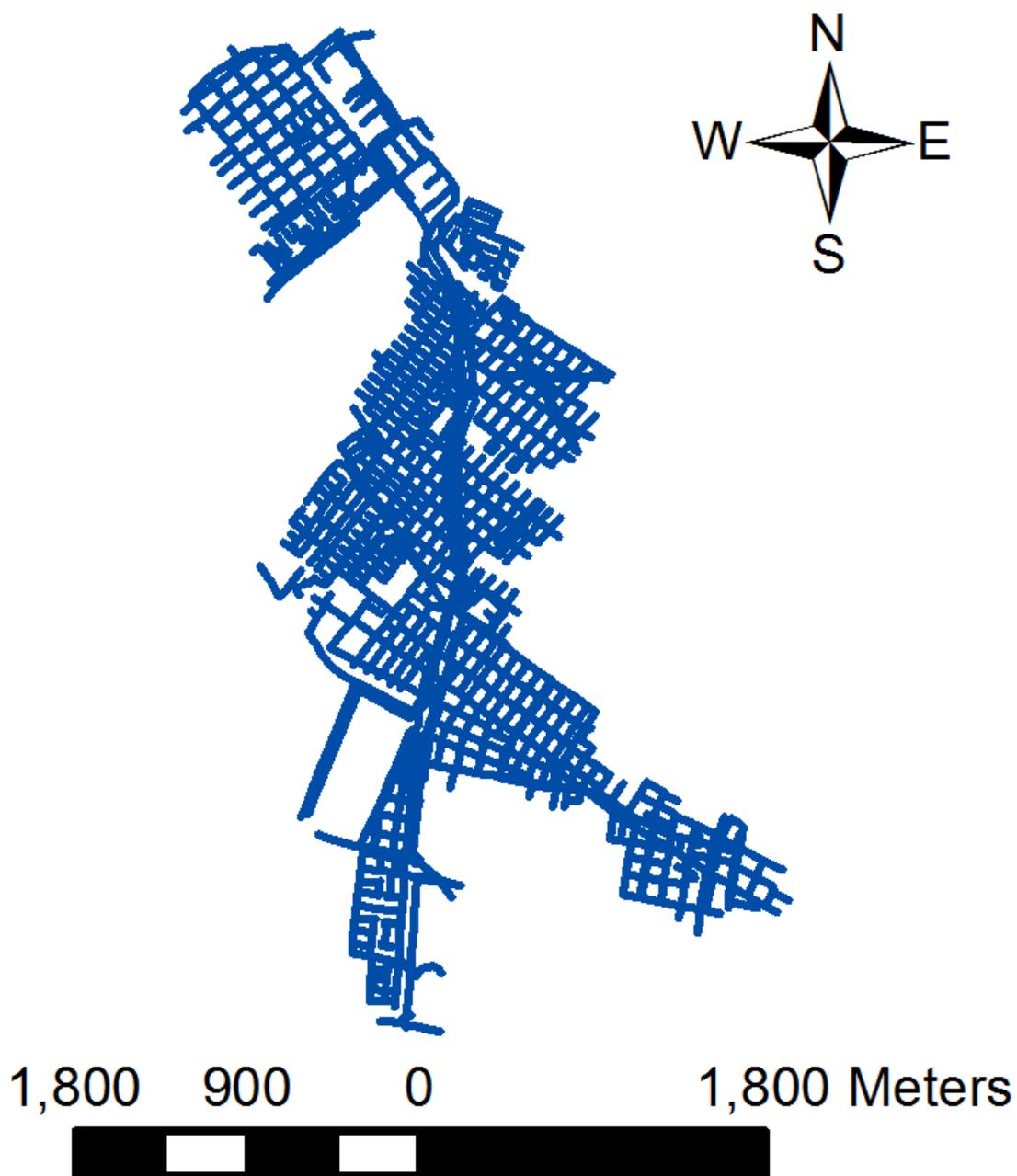


Ilustración 2. Red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre. Fuente: presentación propia de los autores

Las subcuencas aferentes a la subcuenca El Salitre son Bonanza, Juan Amarillo Izquierda, La Vieja, Las Delicias, Río Negro, Río Nuevo y Subcuenca 59.



Ilustración 3. Subcuenca El Salitre. Fuente: Universidad Militar Nueva Granada. (2010). POMCA Salitre, convenio SDA – UMNG.

2.2 Información existente de la zona de estudio

Para este trabajo de grado se contó con información proporcionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) mediante el marco del contrato administrativo No. 9-07-25100-0763-2010, celebrado con la Pontificia Universidad Javeriana. Esta información está compuesta por características físicas de las tuberías pertenecientes a la subcuenca El Salitre, entre las cuales se encuentran: diámetros, materiales, longitudes, cotas claves, cotas rasantes y pendientes así como la ubicación geográfica de cada una de las tuberías de la subcuenca. Además contiene información de los pozos de inspección del sistema de alcantarillado en cuanto a cotas rasantes, cotas de fondo y coordenadas.

Así mismo se contó con datos de precipitación horaria de diferentes estaciones pluviométricas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) suministrados mediante el "Informe técnico sobre estaciones con registro de precipitaciones en la sabana de Bogotá pertenecientes a la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), Pontificia Universidad Javeriana. Maestría en Hidrosistemas. Grupo de investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente. Copete R, James A. (2013)". Los datos de precipitación contienen más de 90 estaciones pluviométricas y climatológicas. Algunas estaciones

tenían registros horarios y otros diarios comprendidos entre los años 2003 y 2013 en algunas estaciones. Para el presente trabajo se seleccionaron dos estaciones aferentes a la subcuenca, Lisboa y San Luis, ubicados en las coordenadas (97389.44, 114576.86) y (104215.70, 105289.97) respectivamente.

2.3 Herramientas Computacionales

A continuación se presentan las herramientas computacionales utilizadas para el desarrollo del presente trabajo de grado, las cuales permitieron la evaluación y análisis de los datos obtenidos.

2.3.1 ArcGIS

ArcGIS es un software en el sistema de información geográfica (SIG) que permite visualizar, manipular, crear y gestionar información geográfica. Esta información es trabajada de manera sistémica, lo que representa una diferencia sustancial a lo relacionado al trabajo con información de planos y mapas. Permite explorar, ver y analizar los datos según parámetros, relaciones y tendencias que presenta la información. Se tiene como resultado diferentes capas de información, mapas y nuevas bases de datos. Permite la elaboración de mapas. Dichos mapas se pueden guardar, imprimir, exportar y ubicar en otros documentos.

Para el desarrollo de este trabajo de grado se utilizó ArcGIS para la obtención de la información georreferenciada perteneciente a cada una de las tuberías existentes, pozos de inspección existentes, estaciones pluviométricas y permitió la generación de las áreas aferentes a cada pozo de inspección utilizando polígonos de Thiessen. Así mismo permitió la elaboración de mapas georreferenciados para una mejor valoración de los resultados.

2.3.2 Programa R

R es un software de libre distribución con un lenguaje y un entorno para el análisis estadístico y gráfico para el manejo en computadores. Ofrece una gran variedad de pruebas y modelos estadísticos. Proporciona gran variedad de herramientas estadísticas y gráficas.

R es un lenguaje enfocado a objetos, lo cual significa que las variables, funciones y resultados se guardan en la memoria activa del computador en forma de objetos con nombre específico. El usuario puede manipular, modificar o analizar esos objetos con operadores y funciones (Paradis, 2003).

El programa se utilizó como plataforma para la modelación hidráulica, hidrológica y el análisis estadístico de los resultados obtenidos.

A continuación se reportan las funciones de R que se utilizaron en la realización de este trabajo de grado:

Tabla 1. Funciones de R utilizadas en el proyecto

Función	Descripción
setwd	Establece un directorio de trabajo
read.table	Crea un marco de datos y lee los datos en forma tabular
read.delim	Es una variación de la función read.table para leer los datos
readLines	Es una variación de la función read.table para leer los datos
as.numeric	Convierte el argumento en datos de tipo numéricos
runif	Realiza simulaciones de MonteCarlo mediante la generación de desviaciones aleatorias con la misma probabilidad de aparición en un rango definido
rnorm	Realiza simulaciones de MonteCarlo mediante la generación de desviaciones aleatorias con probabilidad de aparición cerca a la desviación estándar
as.vector	Convierte un argumento en un vector
cbind	Combina vectores y matrices por columnas

Función	Descripción
match	Encuentra la primera ocurrencia del primer argumento en el Segundo argumento
which	Indica los índices verdaderos o falsos de un valor lógico
write	Genera un archivo
system	Función que permite correr el motor de EpaSWMM
sum	Suma los argumentos de un vector o matriz
lm	Función de modelo lineal
anova	Realiza análisis de varianza
boxplot	Genera diagramas de caja y bigotes de valores agrupados

2.3.3 Programa SewerGEMS

SewerGEMS es programa que permite la modelación de flujo dinámico del sistema de alcantarillado sanitario y combinado. Permite analizar los sistemas de alcantarillado utilizando diferentes funciones y herramientas hidrológicas e hidráulicas. Proporciona un entorno fácil de usar para diseñar, analizar y correr sistemas de alcantarillado pluvial, sanitario y/o combinado. También tiene compatibilidad con programas SIG, CAD y SWMM, por lo cual es muy útil (Bentley, 2014).

Este programa se utilizó para ensamblar el modelo de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre en cuanto a conectividad entre tuberías, pozos de inspección, áreas aferentes y datos de precipitación de las estaciones pluviométricas partiendo de la información existente y generada en ArcGIS. Además de lo anterior SewerGEMS se usó para exportar dicho modelo en formato de lectura para el software EPA-SWMM.

2.3.4 Programa EPA-SWMM

EPA-SWMM es un modelo dinámico de simulación de drenaje de diferentes precipitaciones en el que se pueden utilizar distintas opciones

como lo son un único evento o para realizar una simulación continua en un periodo extendido. El programa permite simular la cantidad de agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos, y realiza diferentes análisis. El primero funciona con una serie de subcuencas a las cuales llega el agua proveniente de la precipitación y genera escorrentía. Otro análisis es con respecto al transporte, pues analiza el recorrido del agua por un sistema compuesto por diferentes componentes (tuberías, bombas, canales, tanques, etc.). Así mismo también permite evaluar la calidad y la cantidad de agua producto de la escorrentía y el caudal en una tubería. Permite la visualización del perfil del agua en el tiempo.

EPA-SWMM simula la respuesta de la cuenca partiendo de datos de precipitación y de otros parámetros meteorológicos y de la caracterización del sistema: subcuencas, conducciones, almacenamiento, etc., resolviendo así el problema hidrológico en superficie, e hidráulico en las conducciones.

El software trabaja diferentes módulos, entre ellos el módulo runoff, el cual tiene como función simular la transformación de la lluvia en escorrentía directa de una cuenca y permite la entrada de hidrogramas en la red de drenaje. Así mismo, en la parte hidráulica, el software trabaja con el modelo de onda dinámica el cual realiza una simplificación al modelo hidrodinámico de Barré de Saint-Venant (BSV).

EPA-SWMM soluciona las ecuaciones del flujo en lámina libre no permanente unidimensional (ecuaciones de Saint-Venant) utilizando un esquema numérico de diferencias finitas de tipo explícito. Este esquema numérico es aplicado partiendo de la representación nodo-conector de una red de drenaje (Múrcia Balaguer, 2011), tal y como se muestra en la Ilustración 4 (Oviedo Escobar, 2012).

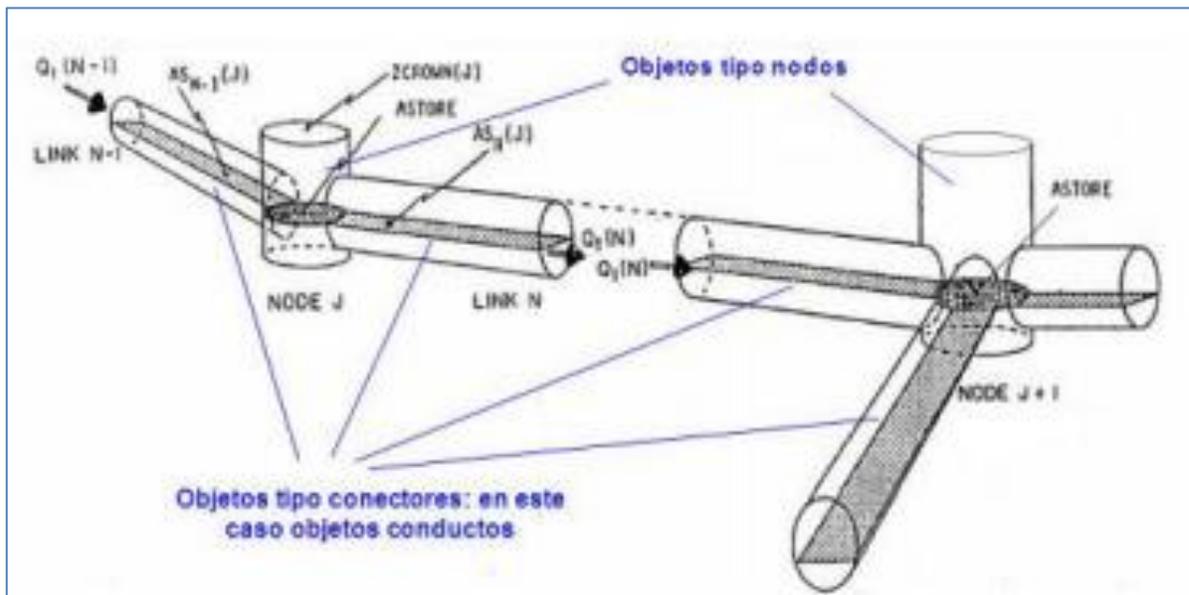


Ilustración 4. Representación del modelo conceptual de Pozo-Tubería en EPA-SWMM. Tomado de Múrcia Balaguer.

Las ecuaciones de Saint-Venant tienen dos partes. La primera de ellas es la ecuación de continuidad que se deduce de la ley de conservación de masa y la segunda la ecuación dinámica que se deduce de la conservación de la cantidad de movimiento (Oviedo Escobar, 2012).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V \partial(V)}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g * (S_o - S_f) = 0 \quad (2)$$

Donde,

A= Área Transversal del Flujo.

t= Tiempo.

H= Profundidad de la lámina de agua.

Q= Caudal.

x= Distancia.

g= Gravedad.

S_f = Pendiente de la línea piezométrica.

S_o = Pendiente de la Tubería.

V = Velocidad.

Este programa se utilizó en el desarrollo de este trabajo de grado para abrir el archivo generado por SewerGEMS, el cual funciona como archivo "semilla" para el análisis en cuestión debido a que contiene la información topológica inicial de la subcuenca El Salitre. Además de lo anterior EPA-SWMM se usó para realizar las simulaciones hidráulicas e hidrológicas.

2.4 Modelación Hidrológica

Se dispone de información georreferenciada de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre proporcionada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá mediante el marco del Contrato administrativo No. 9-07-25100-0763-2010, celebrado con la Pontificia Universidad. Dicho sistema de información georreferenciado contiene datos de las tuberías pertenecientes a la subcuenca El Salitre en cuanto a nodos iniciales y nodos de finales, cotas rasantes iniciales y cotas rasantes finales, cota claves de salida y cotas claves de llegada, diámetros, longitudes, pendientes, materiales, coordenadas en x y en y tanto al inicio como al final de cada tubería, y un número de identificación para cada tubería.

En lo referente a los pozos de inspección de la subcuenca El Salitre se dispone de información pertinente en cuanto a las cotas rasantes, cotas de fondo y un número de identificación para cada pozo de inspección.

En lo relacionado con las estaciones pluviométricas la información disponible contiene nombre de las estaciones, coordenadas de las mismas, sus correspondientes elevaciones, cuenca a la que pertenecen las estaciones, número de identificación según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) (Copete, 2013).

Se eligen dos estaciones pluviométricas teniendo en cuenta que sean aferentes al área de la subcuenca El Salitre y que contengan información

de precipitación con una resolución horaria a lo largo de un periodo de tiempo de un año. Estas son Lisboa, la cual se localiza al noroccidente de la subcuenca, y San Luis, la cual se ubica al suroccidente de la subcuenca. Ambas estaciones pluviométricas tienen información de los registros históricos de precipitación con una resolución horaria y una buena base de datos en cuanto a la duración en años de los eventos de precipitación. Para este trabajo se tomaron los datos desde Febrero de 2008 hasta Febrero de 2009 puesto que en ambas estaciones pluviométricas se contaba con buena calidad en estos datos. Esto debido a que no existían valores faltantes. En la Ilustración 5 se puede observar la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre y la localización de las dos estaciones seleccionadas en el desarrollo del presente trabajo de grado.

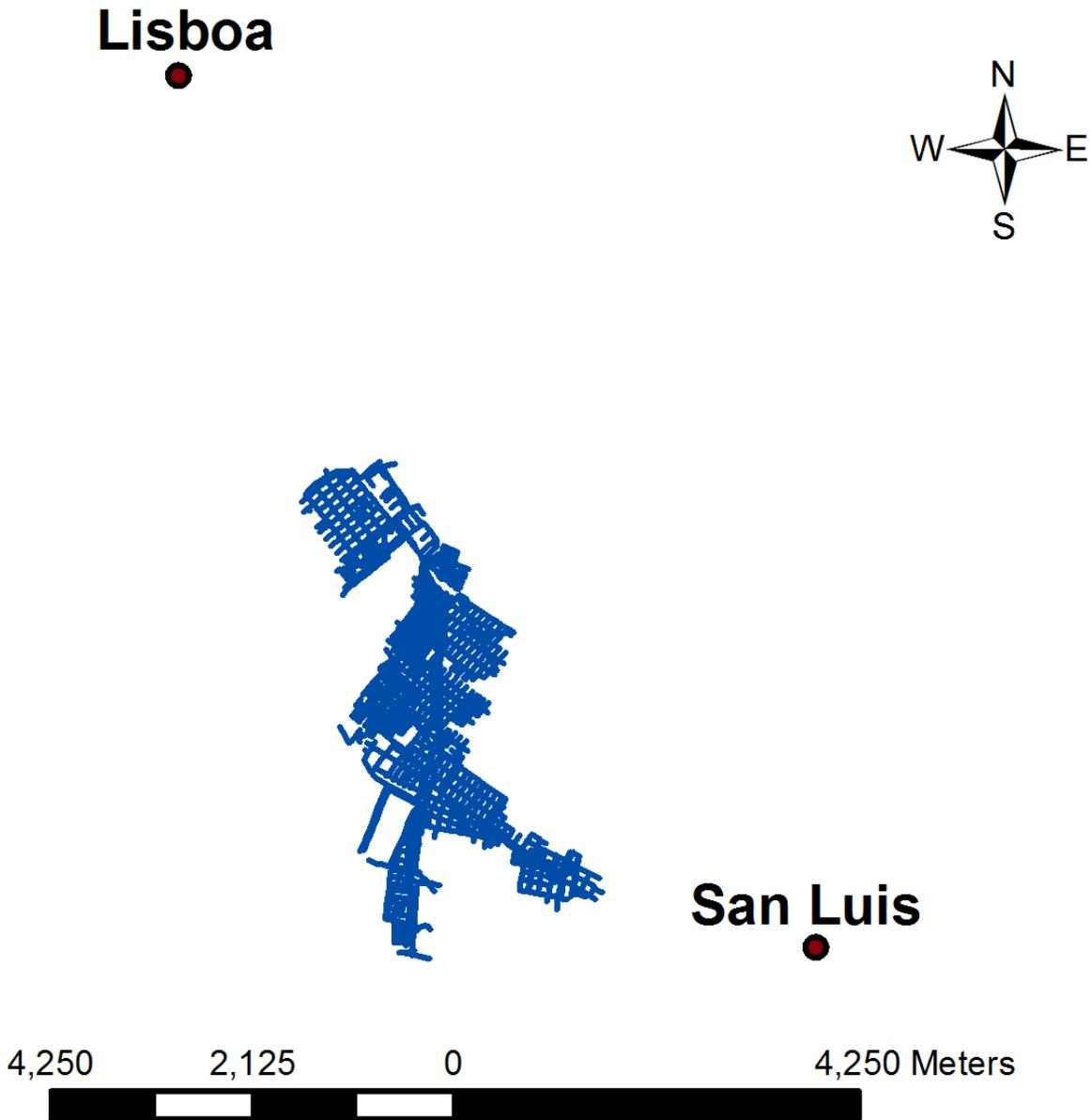


Ilustración 5. Subcuenca El Salitre con las estaciones pluviométricas aferentes.
Fuente: Presentación propia de los autores

Posteriormente se evalúan las series de los datos de precipitación mediante el uso de hojas de cálculo de Excel para definir concretamente el periodo de tiempo en el cual se va a llevar a cabo el análisis. Esta evaluación consiste en observar detalladamente los datos para de esta forma revisar que no existan datos faltantes. Teniendo en cuenta las áreas que ocupan las subcuencas aferentes a la subcuenca El Salitre se

definió la condición de frontera para la subcuenca. Basado en ello, se generaron las áreas aferentes a los pozos de inspección de la red de alcantarillado pluvial mediante polígonos de Thiessen. En la Ilustración 6 se observan los diferentes polígonos de Thiessen obtenidos en el software ArcGIS. Cada microcuenca creada para cada pozo de inspección genera una propia escorrentía que se introduce en la red por dicho pozo o nodo de entrada.

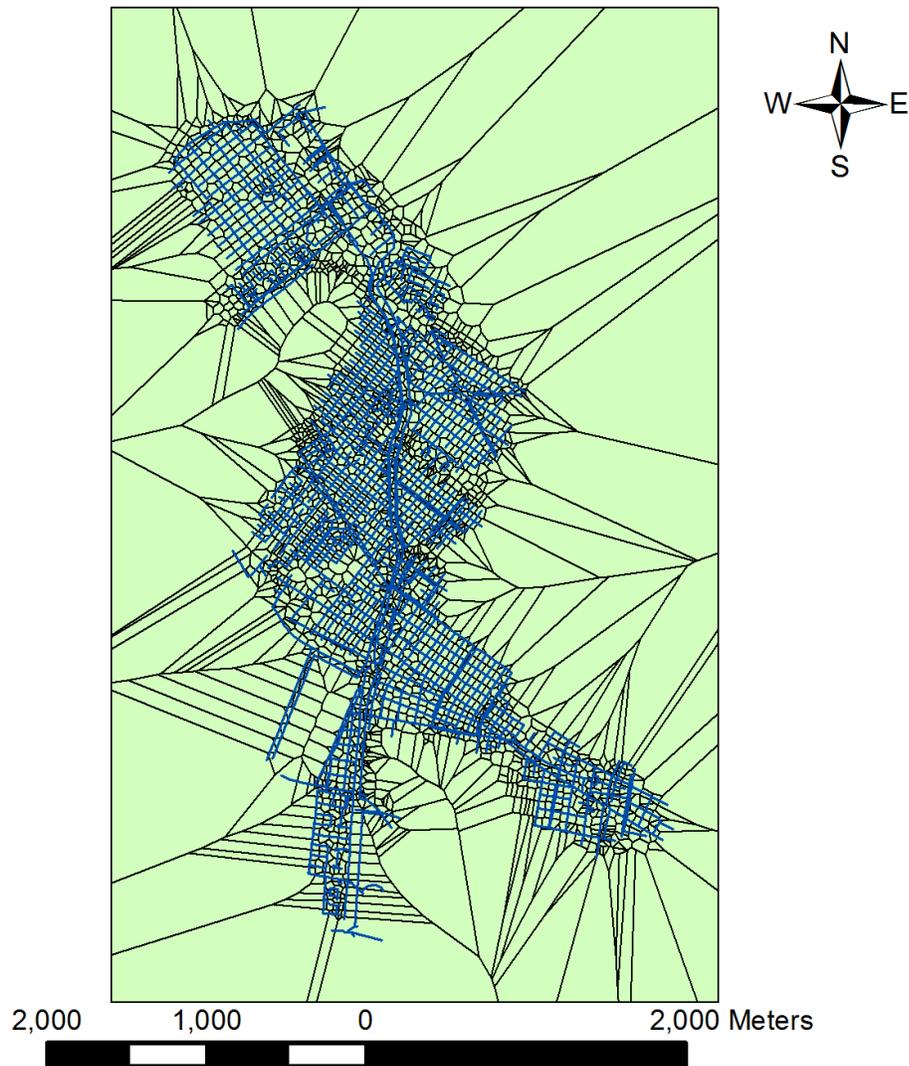


Ilustración 6. Polígonos de Thiessen para los pozos de inspección de la red de alcantarillado de la subcuenca El Salitre. Fuente: Presentación propia de los autores

Utilizando el software SewerGEMS se importan los shapes de los pozos de inspección, de las tuberías y de las áreas aferentes a los pozos generadas en ArcGIS. Se asignan las áreas aferentes a cada pozo de inspección. Se ingresan los registros pluviométricos de las estaciones Lisboa y San Luis. Se asignan las estaciones que captan los eventos de precipitación para cada microcuenca de manera que las áreas ubicadas en la parte superior de la subcuenca El Salitre tengan como estación aferente a la estación Lisboa y las áreas localizadas en la parte inferior de la subcuenca El Salitre se vean afectadas por los eventos de precipitación capturados por la estación San Luis. Las descargas del sistema se localizan en aquellos nodos de la subcuenca El Salitre que tienen conexión con alguna de las subcuencas aferentes al Salitre (Bonanza, Juan Amarillo Izquierda, La Vieja, Las Delicias, Río Negro, Río Nuevo y Subcuenca 59) siempre y cuando las pendientes de las tuberías que conectan con estas otras subcuencas indiquen que el sentido del flujo vaya en dirección saliente de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre.

Posteriormente se hizo uso de un modelo conceptual de lluvia escorrentía, propuesto por EPASWMM 5.0 (Módulo Runoff), el cual usa un depósito no lineal para calcular los hidrogramas de escorrentía superficial que se generan en una cuenca urbana debido a una precipitación (Rossman, 2010) (Múrcia Balaguer, 2011). Tiene como función simular la transformación de la lluvia en escorrentía directa de una cuenca. Para esto la cuenca se divide en un número determinado de subcuencas. Este modelo también considera los procesos de infiltración, almacenamiento en superficie y evaporación. Es aplicable tanto a zonas permeables como impermeables de la subcuenca de estudio. Las pérdidas por infiltración y evaporación son mínimas por lo tanto, en el caso del presente proyecto de grado, se asume que no hay infiltración. Por lo anterior, la succión de capilaridad se asume de 0 milímetros y la velocidad de infiltración se asume de 0 milímetros por hora. En la Ilustración 7 se observa el modelo de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre con áreas aferentes a los pozos de inspección.

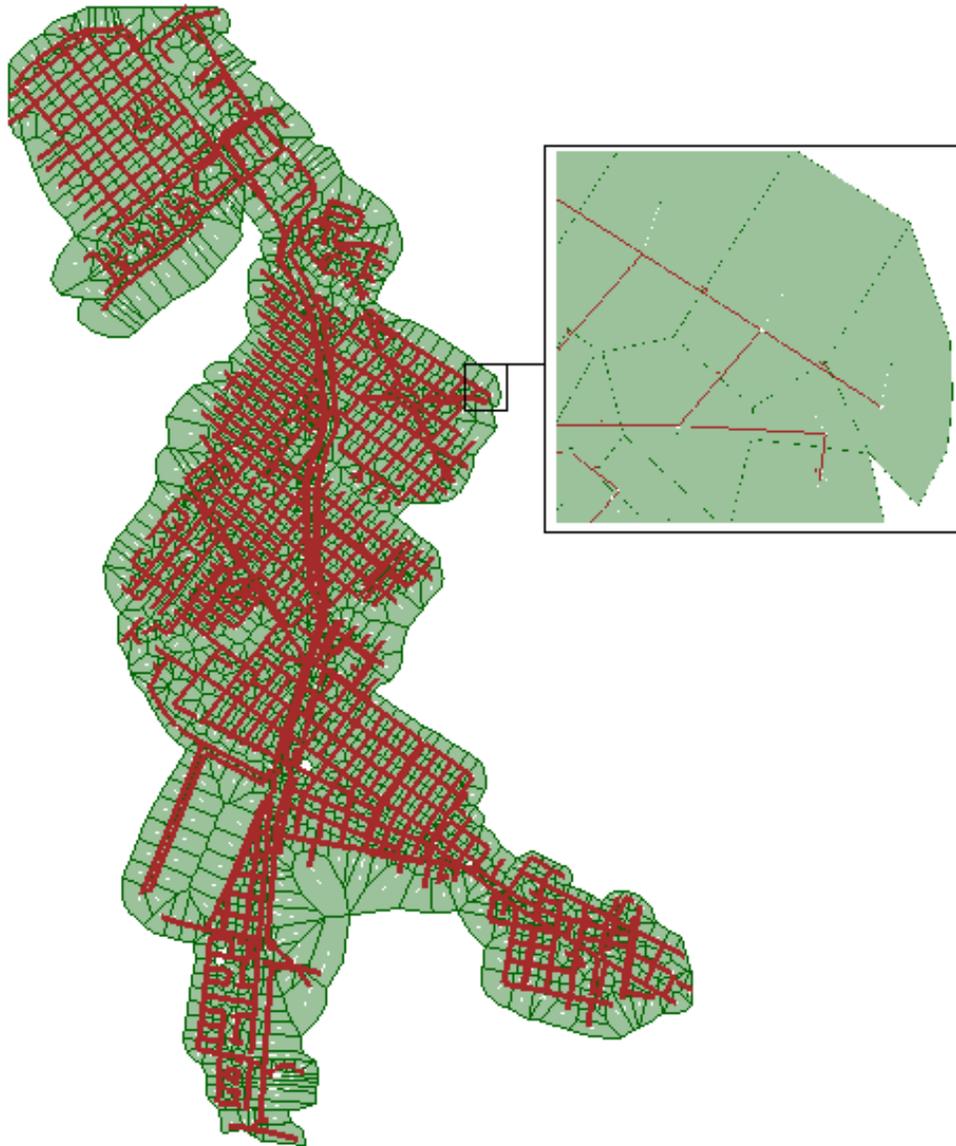


Ilustración 7. Modelo de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre con áreas aferentes a los pozos de inspección asignadas en SewerGEMS. Fuente: Presentación propia de los autores

Los cálculos de escorrentía se basan en el modelo modificado de depósitos con onda cinemática. Se establece tanto el coeficiente de escorrentía mínimo para la subcuenca El Salitre, con valor de 0.45 (Sandoval et al. 2013) como el coeficiente de escorrentía máximo para la subcuenca El Salitre, con valor de 0.70 (Sandoval et al. 2013). Se determina así el rango de posibles valores de coeficientes de escorrentía para la subcuenca El Salitre. Posteriormente, utilizando el método

Montecarlo, el cual es una técnica de análisis numérico que se basa en secuencias de números aleatorios para muestrear los valores de las variables de probabilidad en un problema determinado, se obtienen distintos valores del coeficiente de escorrentía de las microcuencas del sistema. Este proceso se realiza para cada una de las 1000 simulaciones realizadas para el desarrollo del presente trabajo de grado.

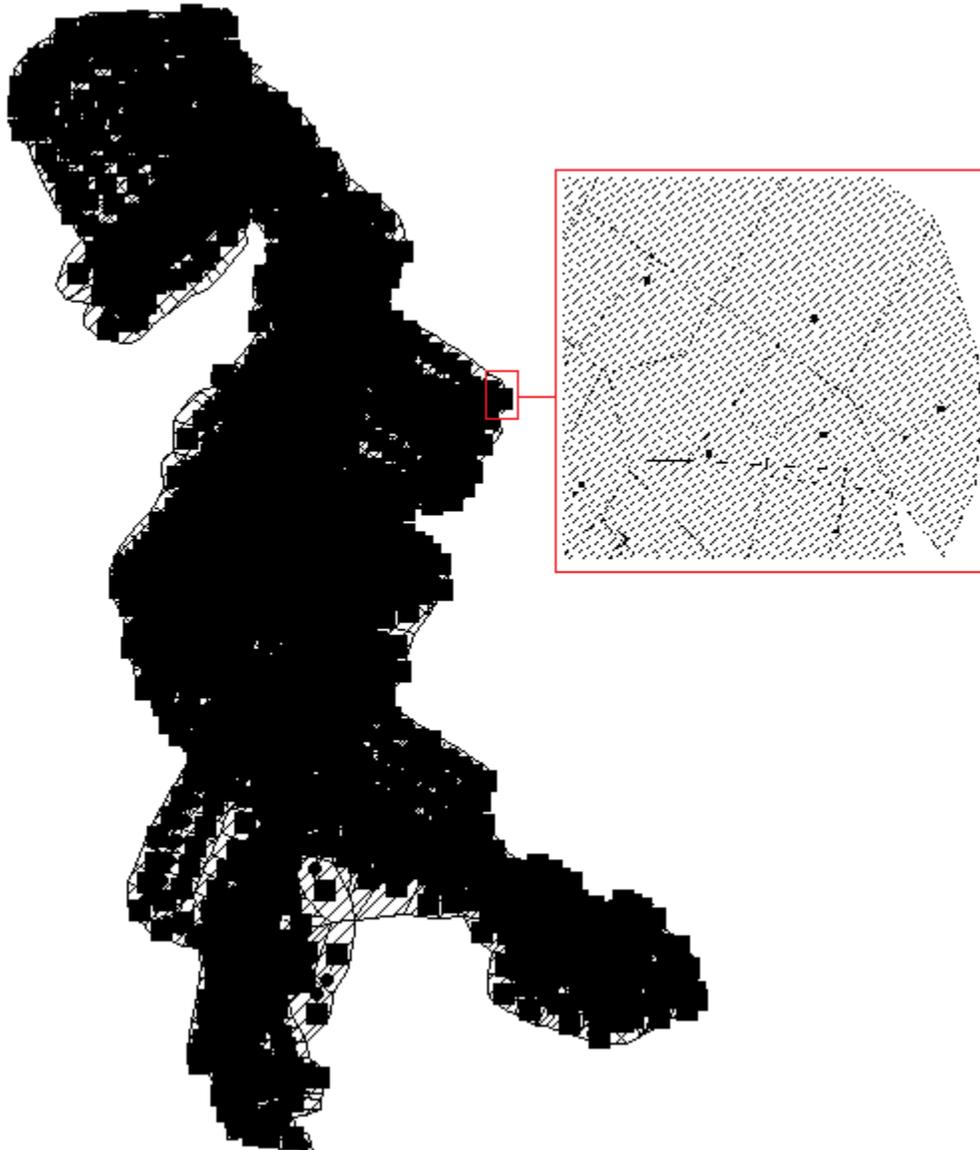


Ilustración 8. Modelo de la red de alcantarillado pluvial de la Subcuenca El Salitre en EPASWMM. Fuente: Presentación propia de los autores

En la Ilustración 9 se describe la metodología implementada de manera esquemática en cuanto a la interacción existente entre ArcGIS, SewerGEMS y EPA-SWMM.

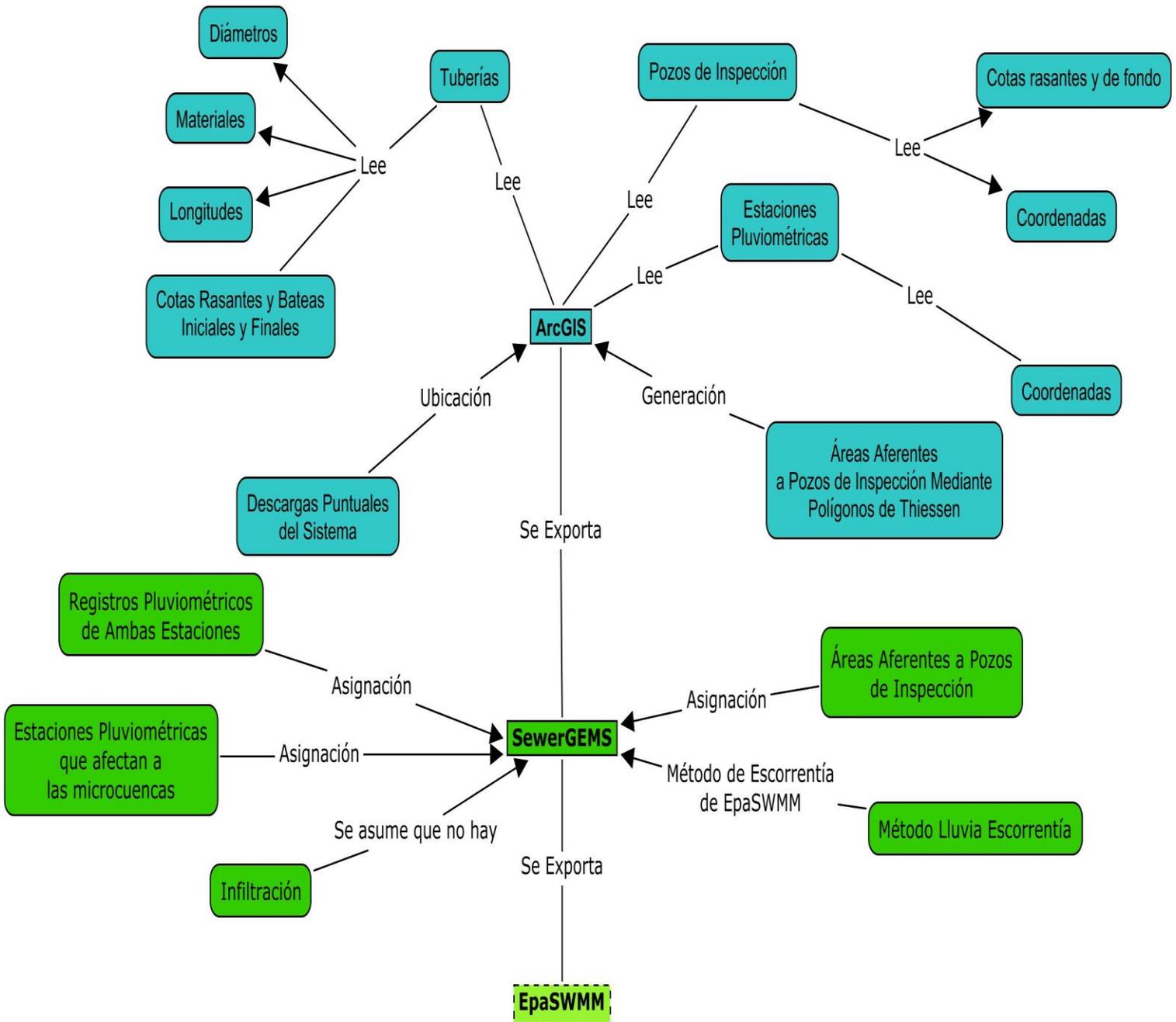


Ilustración 9. Interacción entre ArcGIS, SewerGEMS y EPA-SWMM. Fuente: presentación propia de los autores

2.5 Modelación Hidráulica

El análisis y la modelación hidráulica se realizó utilizando los softwares R y EPA-SWMM mediante una interacción entre estos. Para el desarrollo del presente trabajo se realizaron 1000 simulaciones de Montecarlo. Para cada una de estas simulaciones se genera un archivo nuevo de entrada al modelo de EPA-SWMM desde el software R y este archivo creado se corre con el motor del software EPA-SWMM desde R.

Utilizando el Software R se lee el archivo "semilla" de EPA-SWMM y se almacenan los datos de la topología inicial de las microcuencas: sus nombres, la descarga de cada una, áreas características. Se almacenan los datos de la topología inicial de las tuberías (nombres, pozos aguas arriba y aguas abajo de cada una, longitudes, coeficientes de Manning). Se guardan los nombres de los pozos de inspección del sistema. Posteriormente se realizan simulaciones de Montecarlo para los coeficientes de escorrentía, diámetros, coeficientes de Manning, pendientes y condición de frontera de las áreas de afectación de las estaciones pluviométricas sobre las microcuencas aferentes a los pozos de inspección.

2.5.1 Lectura de datos (Ver Anexo 1):

- a) Se lee la red de alcantarillado con las condiciones iniciales, a la cual se denomina "red semilla".
 - b) Posteriormente se almacenan los nombres de las microcuencas aferentes a los pozos de inspección así como los valores de las áreas y se almacena una coordenada representativa para cada microcuenca tomando las coordenadas de un solo vértice que compone el polígono que representa cada microcuenca.
 - c) Se leen los nombres de los pozos de inspección o nodos de la red de alcantarillado pluvial.
 - d) Se leen los nombres de las tuberías del sistema de alcantarillado pluvial, el nombre del pozo de inspección aguas-arriba o nodo inicial de cada tubería así como el nombre del pozo de inspección aguas-abajo o nodo final de cada tubería, longitudes de las
-

tuberías, diámetros de las tuberías y coeficientes de rugosidad de Manning para cada tubería.

- e) Se leen las coordenadas de las estaciones pluviométricas San Luis y Lisboa.

2.5.2 Cálculos y/o consideraciones (Ver Anexo 1):

- a) Se determina la distancia desde cada una de las dos estaciones pluviométricas hasta un vértice representativo de cada una de las microcuencas de la subcuenca El Salitre. Dicha distancia se calcula como la raíz de la suma de los cuadrados de la diferencia en la coordenada en x entre cada estación pluviométrica hasta un vértice representativo de cada microcuenca y la diferencia en la coordenada en y entre cada estación pluviométrica hasta el mismo vértice.
- b) Se calcula la distancia desde cada una de las dos estaciones pluviométricas hasta el punto más lejano de la red de alcantarillado para cada estación. Se determina así el rango de posibles valores de distancia que cubre o afecta cada una de las dos estaciones pluviométricas sobre la red de alcantarillado, el cual va desde cero hasta la hasta el punto más lejano de red de alcantarillado para cada estación.
- c) Se establece tanto el coeficiente de escorrentía mínimo para la subcuenca El Salitre, con valor de 0.45 (Sandoval et al., 2013), como el coeficiente de escorrentía máximo para la subcuenca El Salitre, con valor de 0.70 (Sandoval et al., 2013). Se determina así el rango de posibles valores de coeficientes de escorrentía para la subcuenca El Salitre.
- d) Se establecen los coeficientes de rugosidad de Manning máximos y mínimos para las tuberías basado en el material de cada tubería. Para tuberías en concreto de la subcuenca El Salitre el coeficiente de Manning mínimo es de 0.011 y el máximo de 0.017 (Sandoval et al., 2013). Para tuberías en policloruro de vinilo (PVC) de la subcuenca El Salitre el coeficiente de Manning mínimo es de 0.011 y el máximo de 0.015 (Sandoval et al., 2013). Para tuberías en gres el coeficiente de Manning mínimo es de 0.011 y el máximo de
-

0.015 (RAS 2000 Tabla D.2.2). Para tuberías en ladrillo el coeficiente de Manning mínimo es de 0.013 y el máximo de 0.017 (RAS 2000 Tabla D.2.2). Se determinan así los posibles rangos de valores de coeficientes de rugosidad de Manning para las tuberías de la subcuenca El Salitre de acuerdo a los materiales de las que están construidas.

- e) Se establecen el porcentaje máximo de variación del diámetro y el porcentaje mínimo de variación del diámetro el cual corresponde a $\pm 1\%$ (Sandoval et al., 2013). Se determina así el rango de posibles valores de diámetro para las tuberías, el cual está comprendido entre -1% del valor inicial del diámetro de cada tubería hasta $+1\%$ del valor inicial del diámetro de cada tubería.
- f) Se establece la máxima distancia entre la cota de fondo de los pozos de inspección y la cota batea de las tuberías con un valor de 75 centímetros (RAS 2000 numeral D.6.4.1). Se determina así el rango de posibles valores del "escalón", el cual es el parámetro que estipula la pendiente de la tubería.
- g) Se calculan los periodos de retorno hidrológicos para cada tubería de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre a partir de las curvas Intesidad-Duración-Frecuencia (IDF) para Bogotá. Estas cambian para las coordenadas de cada una de las dos estaciones pluviométricas en consideración en la presente investigación (San Luis y Lisboa) con base en la zonificación pluvial propuesta para Bogotá (Torres Abello, 2004).

2.5.3 Simulaciones (Ver Anexo 1):

- a) Se realizan 1000 simulaciones.
 - b) En cada simulación se hace uso de simulaciones de Montecarlo para variar los coeficientes de rugosidad de Manning de todas las tuberías de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre.
 - c) En cada simulación se hace uso de simulaciones de Montecarlo para variar los diámetros de todas las tuberías de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre sin sobrepasar o
-

disminuir en más del 1% del valor inicial del diámetro de cada tubería.

- d) En cada simulación se hace uso de simulaciones de Montecarlo para variar las pendientes de todas las tuberías de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre manteniendo el sentido original del flujo.
- e) En cada simulación se hace uso de simulaciones de Montecarlo para variar los coeficientes de escorrentía de todas las microcuencas de la subcuenca El Salitre.
- f) En cada simulación se hace uso de simulaciones de Montecarlo para variar la condición de frontera que delimita el área de afectación de cada una de las dos estaciones pluviométricas sobre la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre.
- g) Cada simulación considera dos estaciones pluviométricas con los mismos registros de lluvias de una resolución horaria por un periodo de un año.

En la Ilustración 10 se describe la metodología implementada de manera esquemática en cuanto a la interacción existente entre EPA-SWMM, R y su retorno a EPA-SWMM nuevamente.

Cada simulación se ejecuta en un tiempo promedio de 20 horas. Por tal razón fue necesario el uso de 75 computadores con sistema operativo Windows. Cada computador tenía tres sesiones iniciadas. En cada sesión se corrieron aproximadamente 5 simulaciones. De esta manera fue posible obtener la cantidad de simulaciones realizadas en un tiempo aproximado de 4 días. De los 75 computadores utilizados 50 fueron suministrados por la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) gracias a la colaboración de las facultades de ingeniería civil y de ingeniería de sistemas. Los otros 25 computadores fueron proporcionados por la empresa Ingeniería e Hidrosistemas Grupo Consultoría (IEH GRUCON).

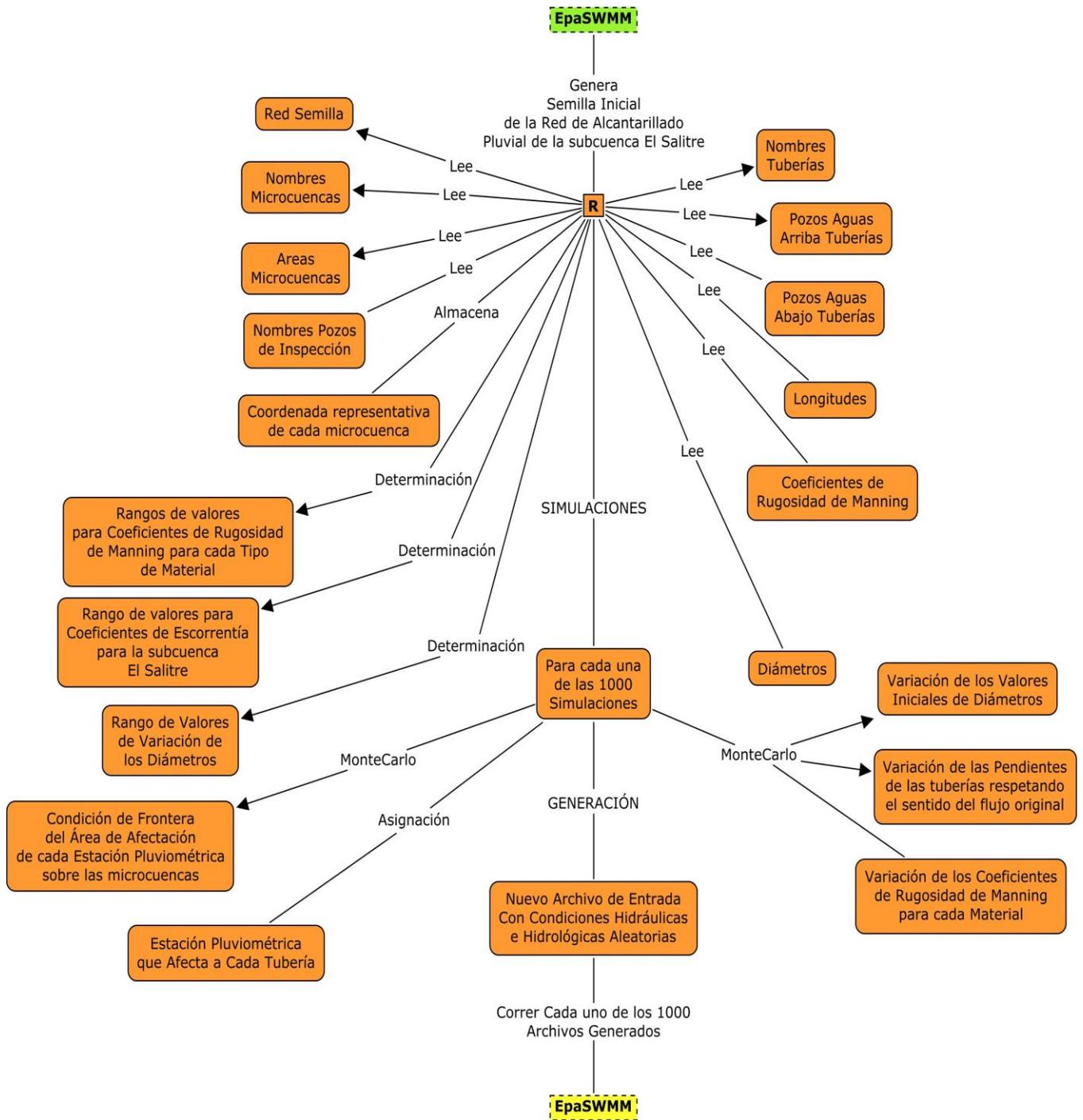


Ilustración 10. Interacción entre EPASWMM-R-EPASWMM. Fuente: Presentación propia de los autores

2.6 Análisis de Resultados Hidráulicos

Se corren las 1000 simulaciones utilizando la interacción de los softwares R y EPA-SWMM y se determinan la cantidad de eventos de inundación en el año de precipitación para cada tubería en cada una de las simulaciones. Teniendo en cuenta que un evento de inundación sucede cuando la altura de la lámina de agua supera o iguala el valor del diámetro interno de la tubería en cualquier instante de tiempo a lo largo de esta.

A partir del cálculo de la cantidad de eventos de inundación se calcula el número total de inundaciones de cada tubería para las 1000 simulaciones utilizando el software R.

Posteriormente se determina la probabilidad de inundación de cada tubería, la cual se entiende como la posible cantidad de eventos cuya lámina de agua iguala o excede el diámetro interno de la tubería en el periodo de tiempo analizado. Se calcula como la sumatoria de la cantidad de eventos de inundación de las 1000 simulaciones en cada tubería entre el número de simulaciones por la cantidad de periodos analizados.

$$Probabilidad_{Inundación} = \frac{\sum \text{Cantidad de eventos de inundación}}{1000 \text{ Simulaciones} * 53 \text{ semanas}} \quad (3)$$

Luego se determina el número medio de eventos de inundación que pueden ocurrir en un año determinado para todas las tuberías de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre como la probabilidad de inundación multiplicado por el periodo de tiempo analizado y que corresponde a un año.

$$\text{Numero eventos medios} = Probabilidad_{Inundación} * 53 \text{ semanas} \quad (4)$$

Posterior a ello se determina el periodo de retorno hidráulico de inundación, el cual es el número de años que en promedio la magnitud de un evento extremo es igualada o excedida. Se calcula como el inverso matemático del número medio de eventos de inundación que

pueden ocurrir en un año determinado para todas las tuberías de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre.

$$T_{\text{retorno hidráulico}} = \frac{1}{\text{Numero eventos medios de inundación}} \quad (5)$$

Si el número de eventos de inundación es igual a cero indica que el periodo de retorno hidráulico es mayor a 1. Esto quiere decir que no existieron eventos hidrológicos durante el año analizado que generaran inundación en esa tubería.

Posteriormente se calculan las frecuencias hidráulicas como el inverso del periodo de retorno hidráulico de cada tubería.

$$\text{Frecuencia Hidráulica} = \frac{1}{T_{\text{retorno hidraulico}}} \quad (6)$$

Finalmente se determinan las máximas intensidades de precipitación por semana a lo largo del año de análisis tanto para la estación pluviométrica San Luis como para Lisboa y de acuerdo al periodo de retorno hidráulico obtenido para cada tubería se determina la intensidad máxima de precipitación que genera inundación para cada tubería de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre.

En el Ilustración 11 se describe la metodología implementada de manera esquemática en cuanto a la interacción existente entre EPA-SWMM y R y los cálculos realizados.

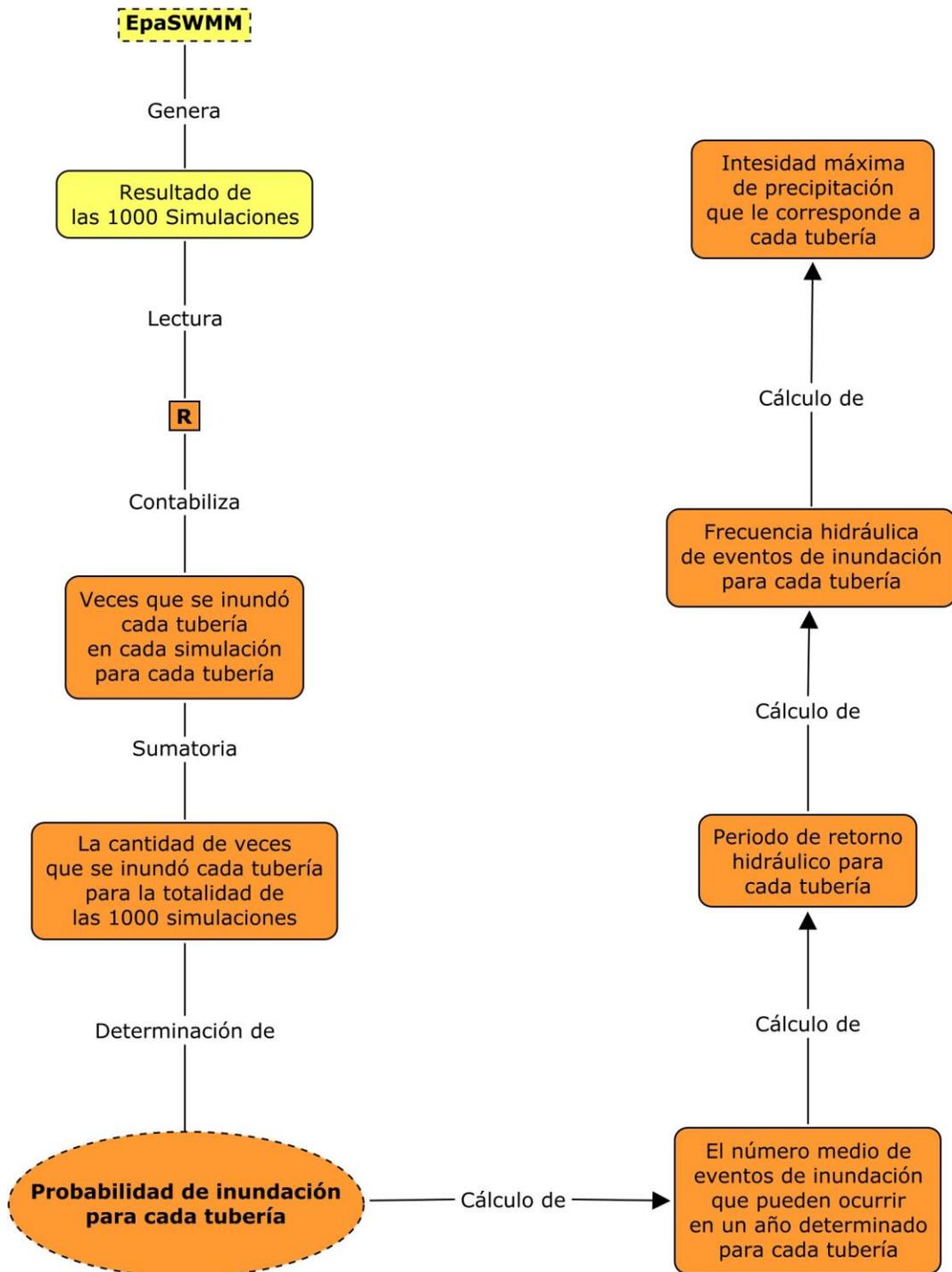


Ilustración 11. Interacción entre EPASWMM-R. Fuente: Presentación propia de los autores

Para la correcta visualización de las probabilidades de inundación en el sistema de información georreferenciado la red de alcantarillado se ha dividido en cinco rangos, distribuidos de la siguiente manera de acuerdo a las probabilidades de inundación:

1. Tuberías cuya probabilidad de inundación está comprendida entre 0% y 20%. Se consideran con una muy baja probabilidad de inundación.
2. Tuberías cuya probabilidad de inundación está comprendida entre 20% y 40%. Se consideran con una baja probabilidad de inundación.
3. Tuberías cuya probabilidad de inundación está comprendida entre 40% y 60%. Se consideran con una moderada probabilidad de inundación.
4. Tuberías cuya probabilidad de inundación está comprendida entre 60% y 80%. Se consideran con una alta probabilidad de inundación.
5. Tuberías cuya probabilidad de inundación está comprendida entre 80% y 100%. Se consideran con una muy alta probabilidad de inundación.

Además de la clasificación anteriormente expuesta, la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre también se ha dividido en diez rangos, comprendidos entre 1 y 10, y distribuidos de la siguiente manera de acuerdo con los periodos de retorno hidráulicos:

1. Tuberías que no se inundan.
2. Tuberías que se inundan con un periodo de retorno mayor a un año (53 semanas), es decir, que en el año de lluvias registrado y analizado no presentaron inundaciones.

3. Tuberías que se inundan con una frecuencia comprendida entre cada 40 semanas y cada 53 semanas, es decir, entre cada 10 meses y un año.
4. Tuberías que se inundan con una frecuencia comprendida entre cada 26 semanas y cada 40 semanas, es decir, entre cada 6 meses y medio y diez meses.
5. Tuberías que se inundan con una frecuencia comprendida entre cada 13 semanas y cada 26 semanas, es decir, entre cada 3 meses con una semana y 6 meses y medio.
6. Tuberías que se inundan con una frecuencia comprendida entre cada 8 semanas y cada 13 semanas, es decir, entre cada 2 meses y 3 meses con una semana.
7. Tuberías que se inundan con una frecuencia comprendida entre cada 4 semanas y cada 8 semanas, es decir, entre cada mes y 2 meses.
8. Tuberías que se inundan con una frecuencia comprendida entre cada 2 semanas y cada 4 semanas, las cuales se consideran bajamente críticas.
9. Tuberías que se inundan con una frecuencia comprendida entre cada semana y cada 2 semanas, las cuales se consideran moderadamente críticas.
10. Tuberías que se inundan con una frecuencia semanal, las cuales se consideran altamente críticas.

Dicha metodología para la clasificación de los periodos de retorno hidráulicos anteriormente expuesta se muestra resumida en la Tabla 2.

Tabla 2. Rangos de periodo de retorno hidráulico según categoría. Fuente: Presentación propia de los autores

Rango Periodo de Retorno Hidráulico		Categoría
0.000	0.019	10
0.019	0.038	9
0.038	0.075	8
0.075	0.151	7
0.151	0.245	6
0.245	0.491	5
0.491	0.755	4
0.755	1.000	3
>	1.000	2
>1"		1

Fuente: Presentación propia de los autores

Posteriormente se obtiene la mediana de cada una de las variables (diámetro, coeficiente de rugosidad de Manning, pendiente, coeficiente de escorrentía) para cada tubería en las 1000 simulaciones.

Consecutivamente se implementa la prueba de Kruskal Wallis, también llamada prueba H de Kruskal-Wallis. Esta es una generalización de la prueba de la suma de rangos para el caso $k > 2$ muestras. Se utiliza para probar la hipótesis nula (H_0) de que k muestras independientes provienen de poblaciones idénticas. Introducida en 1952 por W.H. Kruskal y W.A. Wallis, la prueba es un procedimiento no paramétrico para probar la igualdad de las medias en el análisis de varianza de un factor cuando el experimentador desea evitar la suposición de que las muestras se seleccionaron de poblaciones normales (Walpole Ronald E., 1999).

Sea n_i ($i = 1, 2, \dots, k$) el número de observaciones en la i -ésima muestra, primero, se combinan todas las k muestras y se acomodan las observaciones en orden ascendente, para sustituir el rango apropiado de $1, 2, \dots, n$ para cada observación. En el caso de empates (observaciones

idénticas), se sigue el procedimiento acostumbrado de reemplazar las observaciones por las medias de los rangos que tendrían las observaciones si fueran distinguibles. La suma de los rangos que corresponde a las observaciones en la i -ésima muestra se denota mediante la variable aleatoria (Walpole Ronald E., 1999).

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^K \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1) \quad (7)$$

Considerando ahora la estadística que se aproxima muy bien mediante una distribución Chi cuadrada con $k-1$ grados de libertad cuando H_0 es verdadera y si cada muestra consiste en al menos 5 observaciones. Nótese que el estadístico H toma el valor h , donde:

$$h = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^K \frac{r_i^2}{n_i} - 3(n+1) \quad (8)$$

Cuando R_1 toma el valor r_1 , R_2 toma el valor r_2 , etc. El hecho de que h sea grande cuando las muestras independientes provienen de poblaciones que no son idénticas permite establecer el siguiente criterio de decisión para probar H_0 .

Si h cae en la región crítica con $v=k-1$ grados de libertad, se debe rechazar H_0 en el nivel de significancia; en cualquier otro caso, se debe aceptar H_0 .

Se hizo uso de la prueba de Kruskal-Wallis en investigación ya que es una prueba no paramétrica reconocida que se puede aplicar a diferentes grupos de variables.

El objetivo de usar Kruskal - Wallis es determinar cuál de las variables (diámetro, pendiente, coeficiente de rugosidad de Manning y coeficiente de escorrentía) influye más significativamente en la probabilidad de inundación. Para esto se desarrolló un programa que permite obtener cuál de dichas variables independientes tiene una mayor influencia sobre la variable dependiente.

El programa inicia leyendo los datos del archivo Datos.txt, el cual proviene de las medianas de las variables para cada tubería como resultado de las 1000 simulaciones. Luego se realiza una prueba

Kruskal-Wallis utilizando el rango de la probabilidad de inundación (0-1) y se obtiene la variable que más influye en la probabilidad de inundación del sistema de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre. Finalmente se grafican los diagramas de cajas por cada par de variables (probabilidad de inundación contra diámetro, coeficiente de rugosidad de Manning, pendiente y coeficiente de escorrentía) (Ilustración 13).

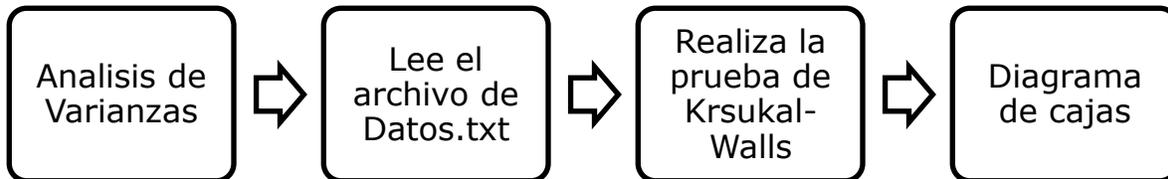


Ilustración 12. Proceso de análisis de variables influyentes en la probabilidad de inundación. Fuente: Presentación propia de los autores

Con el propósito de realizar los diagramas de cajas se determinan los percentiles 33 y 67 para cada una de las medianas de diámetro, coeficiente de rugosidad de Manning, pendiente y coeficiente de escorrentía. Posteriormente se identifican 3 rangos. El primer rango está comprendido entre el valor mínimo y el percentil 33, el segundo rango entre el percentil 33 y el percentil 67 y el tercer rango entre el percentil 67 y el valor máximo.

2.7 Análisis de Resultados Hidrológicos

1. Se determinan, tanto para la estación San Luis como para Lisboa, la máxima intensidad de precipitación registrada por semana durante el año de lluvias (desde Febrero de 2008 hasta Febrero de 2009). Posteriormente se calcula la intensidad máxima para la subcuenca El Salitre como la máxima precipitación por semana para cada una de las dos estaciones pluviométricas. Se considera más crítica aquella precipitación que es suficientemente pequeña como para generar inundación en alguna tubería de la red de alcantarillado pluvial.
2. Partiendo de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para la ciudad de Bogotá y con base en las intensidades

hidráulicas máximas para cada tubería, suponiendo un tiempo de concentración mínimo recomendado por el RAS 2000 de 10 minutos (TITULO D, D.4.3.7), se determinan los periodos de retorno hidrológicos correspondientes a la inundación en cada tubería.

3. Se grafican los periodos de retorno hidrológicos de cada tubería contra los periodos de retorno hidráulicos de cada tubería.

3 RESULTADOS

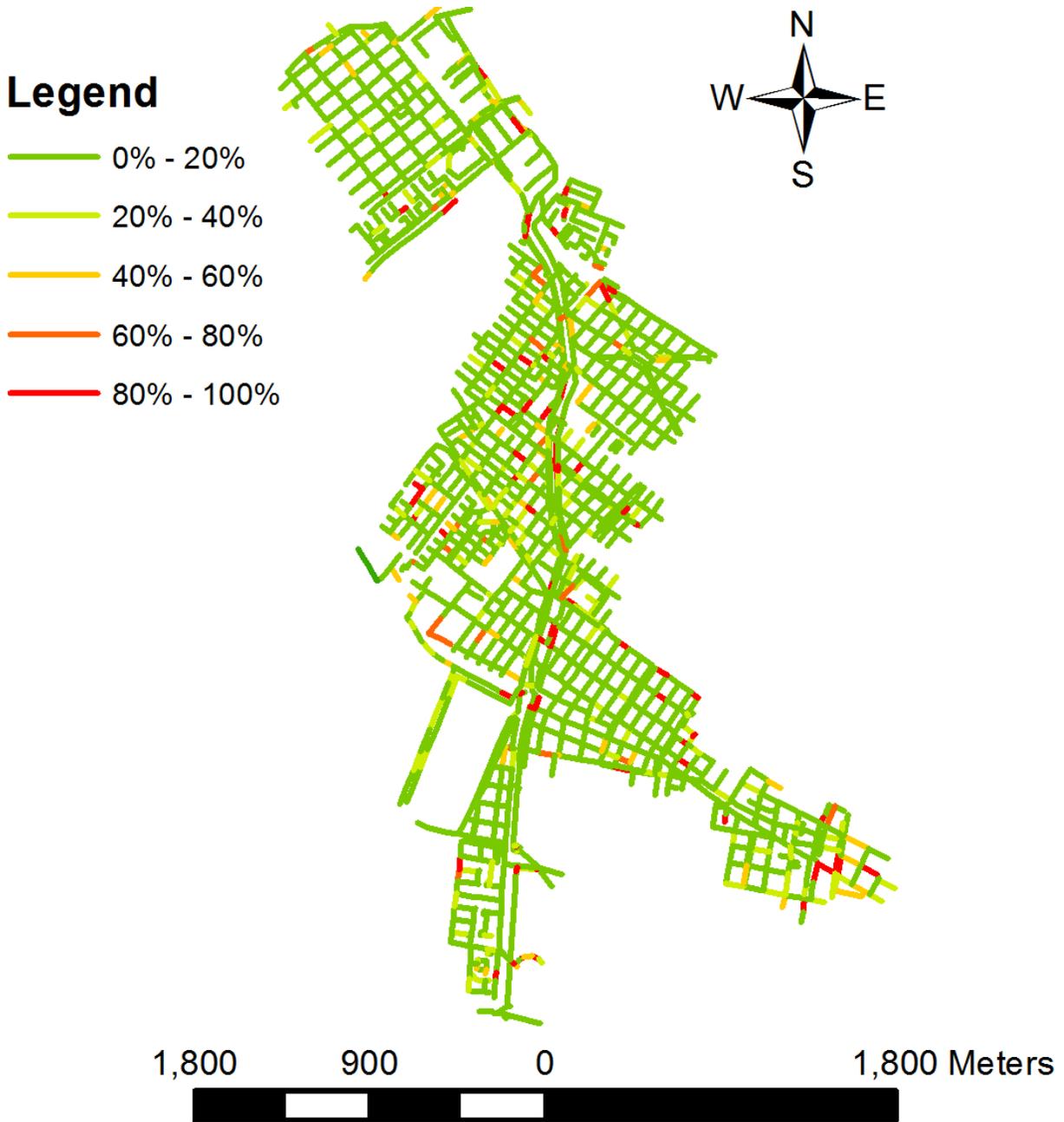


Ilustración 13. Probabilidad de inundación de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre. Fuente: Presentación propia de los autores

Se obtiene que el 87.2% de las tuberías de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre presenta una probabilidad de inundación entre 0% y 20% a lo largo del periodo de lluvias registrado con una resolución horaria. Además se tiene que el 9.4% de dichas tuberías presentan una probabilidad de inundación entre 20% y 40%. Al mismo tiempo se tienen unos porcentajes de 3.9% de las tuberías de la red tanto para probabilidades de inundación entre 40% y 60% como para probabilidades de inundación que entre 80% y 100%. Finalmente se obtuvo que únicamente un 1.4% de las tuberías tiene una probabilidad de inundación entre 60% y 80%.

Este puede ser un indicativo de que la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre se encuentra en buen estado y su diseño soporta sin esfuerzo alguno los eventos de precipitación presentes en la zona pues únicamente un 3.9% de las tuberías de la red tienen una muy alta probabilidad de inundación y un 1.4% de las tuberías tienen una alta probabilidad de inundación. Esto indica que tan solo un 5.3% de las tuberías de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre presentan una probabilidad de inundación relativamente alta.

Los valores de periodos de retorno hidráulico obtenidos tienen un valor promedio de 7 años.

A continuación en la Ilustración 14 se pueden observar los periodos de retorno hidráulicos para las diferentes tuberías de la subcuenca El Salitre.

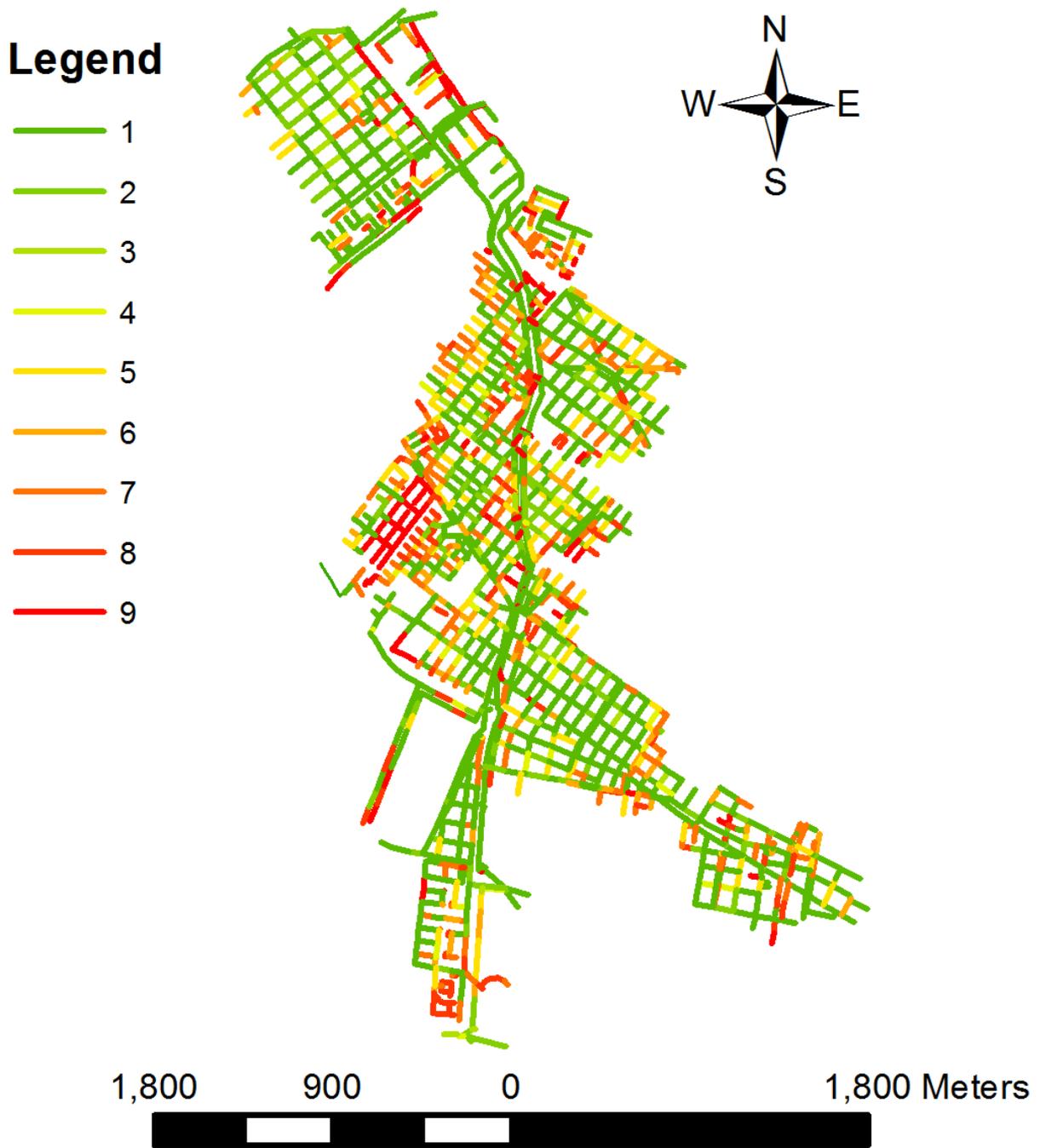


Ilustración 14. Periodos de retorno hidráulicos de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre. Fuente: Presentación propia de los autores

Se obtiene que el 50.6% de las tuberías de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre no presenta inundación en el periodo de lluvias registrado con una resolución horaria.

También se tiene que el 11.2% de las tuberías presentan inundación entre cada 1 mes y 2 meses.

Además se tiene que el 10.4% de dichas tuberías presentan inundación en un periodo mayor a un año. El 8.4% de las tuberías pertenecientes a la red en cuestión pueden presentar inundación entre cada 2 semanas y 1 mes.

Por otra parte se tiene que el 7.1% de las tuberías del sistema de alcantarillado pluvial presentó eventos de inundación entre cada 13 y cada 26 semanas.

Al mismo tiempo se tienen unos porcentajes de 6.7% de las tuberías de la red tanto para eventos de inundaciones que ocurren entre cada semana y cada 2 semanas como para eventos de inundación que ocurren entre cada 8 y cada 13 semanas.

Se tiene que un 3.1% de las tuberías pueden presentar inundación entre cada 26 y 40 semanas, en tanto que un 1.6% pueden presentar inundación entre cada 10 meses y un año.

Finalmente se obtuvo que ninguna tubería tiene una probabilidad de inundarse con una frecuencia semanal.

Este puede ser un indicativo de que la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre se encuentra en buen estado y se necesitan eventos de precipitación de altos periodos de retornos hidrológicos para generar inundación en la red.

Utilizando la prueba estadística de Kruskal-Wallis se encuentra como variable predominante e influyente a los diámetros de las tuberías aún por encima de las pendientes de las tuberías, los materiales y los coeficientes de escorrentía de las microcuencas (Tabla 3). Se evidencia entonces la importancia del diámetro para el buen funcionamiento y la

correcta operación de la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre desde el punto de vista de la probabilidad de inundación.

Así mismo se obtiene que los diámetros críticos son aquellos valores pequeños en los cuales el valor del periodo de retorno hidráulico es pequeño, por lo cual su frecuencia de ocurrencia es alta y su probabilidad de inundación muy alta.

Tabla 3. Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis

	row.names	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
1	D	1	1433738	1433738	4.984284	0.02569084
2	n	1	15860.67	15860.67	0.05513843	0.8143762
3	S	1	306994.7	306994.7	1.067244	0.3016959
4	C	1	240163.1	240163.1	0.8349089	0.360969
5	Residuals	1965	565235818	287651.8	NA	NA

Fuente: Presentación propia de los autores

En la Ilustración 15 se puede observar el diagrama de cajas y bigotes de la probabilidad de inundación para los tres rangos de los diámetros internos de las tuberías. Se obtiene que a medida que en la muestra se tienen en cuenta diámetros cada vez mayores la probabilidad de inundación disminuye. Entonces se tiene una mayor probabilidad de inundación en los menores diámetros presentes en la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre, los cuales corresponden a aquellos por debajo de 25 centímetros de diámetro interno, y esta disminuye paulatinamente en la medida que se presentan diámetros cada vez mayores los cuales van hasta valores cercanos a 1.2 metros.

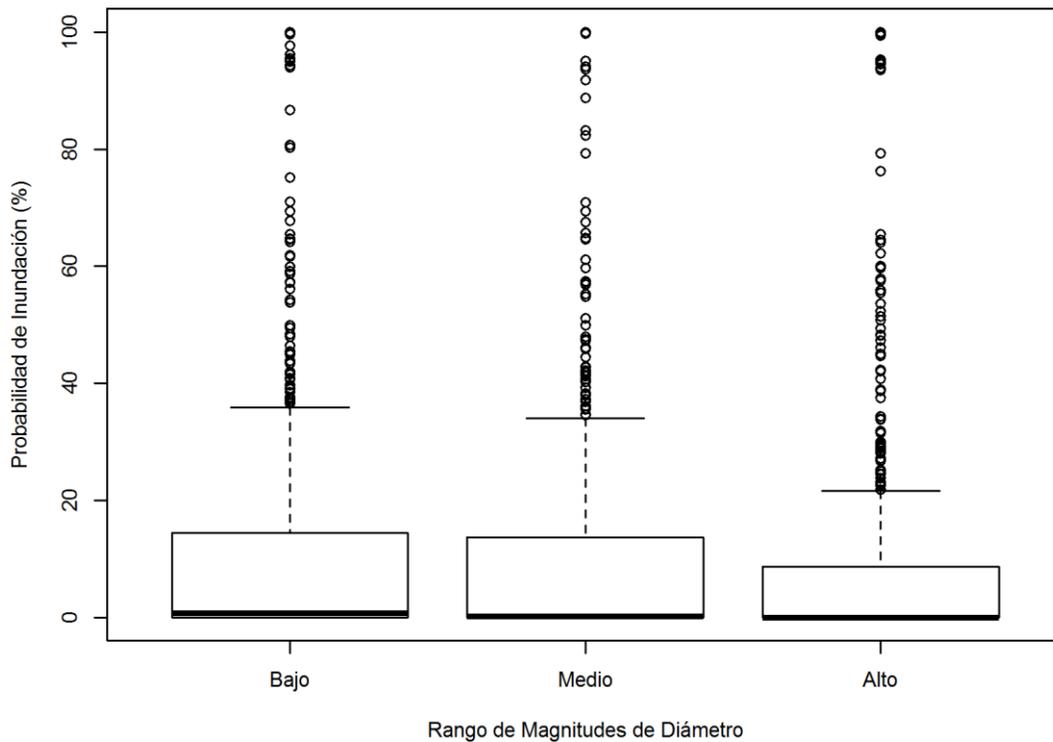


Ilustración 15. Diagrama de cajas de probabilidad de inundación para los rangos de diámetro. Fuente: Presentación propia de los autores

En la Ilustración 16 se puede observar el diagrama de cajas y bigotes de la probabilidad de inundación para los tres rangos de los coeficientes de rugosidad de Manning. Se obtiene que se presenta una mayor probabilidad de inundación en aquellos materiales cuyo coeficiente de rugosidad de Manning es cercano a 0.014 y disminuye en aquellos valores que se encuentran por encima o por debajo de 0.014. Dicho valor de 0.014, de acuerdo a valores aproximados y promedios basados en el RAS 2000 Tabla D.2.2 y en (Sandoval et al., 2013) corresponde al concreto. Por lo tanto, el material que genera una mayor probabilidad de inundación en la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre es el concreto en comparación con el PVC, el gres y el ladrillo.

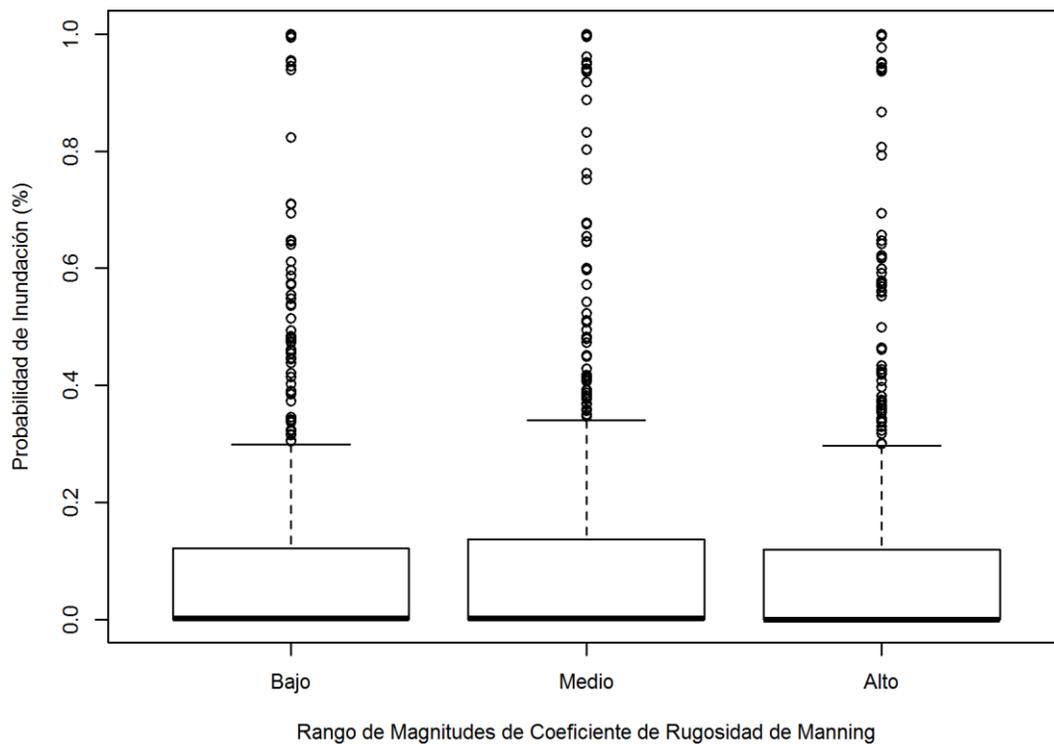


Ilustración 16. Diagrama de cajas de probabilidad de inundación para los rangos de coeficiente de rugosidad de Manning. Fuente: Presentación propia de los autores

En la Ilustración 17 se puede observar el diagrama de cajas y bigotes de la probabilidad de inundación para los tres rangos de las pendientes. Se obtiene la probabilidad de inundación es mayor en aquellas pendientes cercanas al 7% y disminuye para aquellas pendientes menores al 7%.

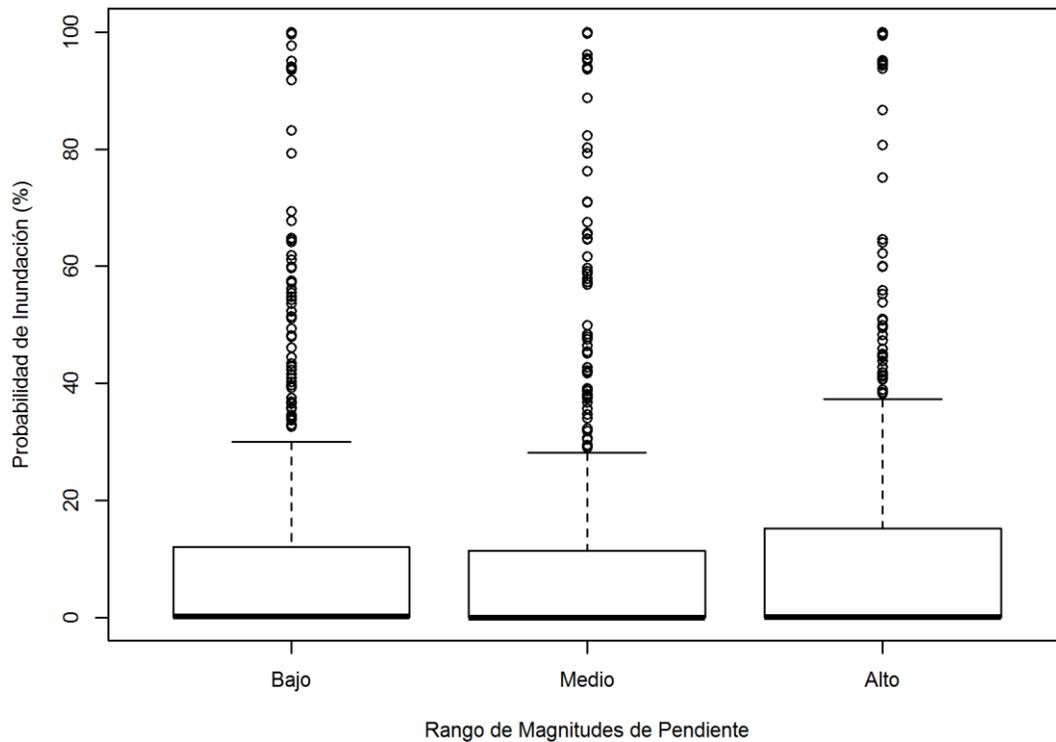


Ilustración 17. Diagrama de cajas de probabilidad de inundación para los rangos de pendientes. Fuente: Presentación propia de los autores

En la Ilustración 18 se puede observar el diagrama de cajas y bigotes de la probabilidad de inundación para los tres rangos de los coeficientes de escorrentía. Se obtiene que la probabilidad de inundación es mayor para aquellos coeficientes de escorrentía menores, con valor cercano a 0.56 y disminuye para aquellos coeficientes de escorrentía mayores, con valor de 0.59.

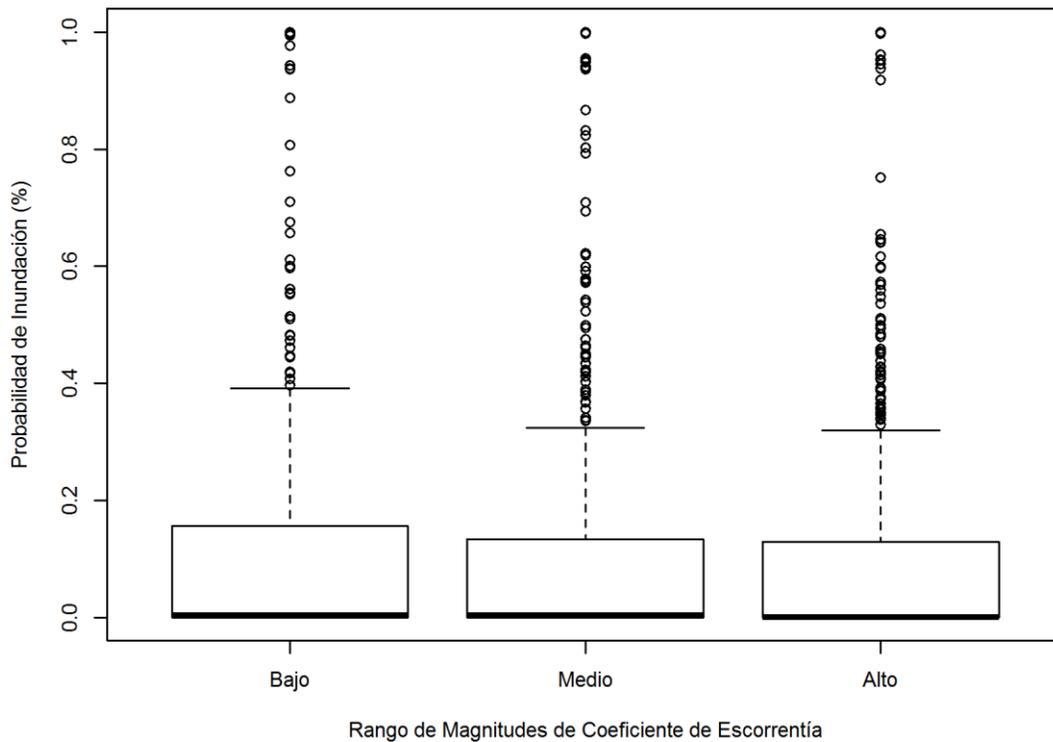


Ilustración 18. Diagrama de cajas de probabilidad de inundación para los rangos de coeficiente de escorrentía . Fuente: Presentación propia de los autores

De la Ilustración 19 se nota que existe una relación directamente proporcional entre el periodo de retorno hidráulico y el periodo de retorno hidrológico, en donde entre mayor es el periodo de retorno hidráulico mayor es el periodo de retorno hidrológico.

Para determinar dicha relación se calibró el modelo y se trazó una envolvente de la serie de datos con el criterio que cubriera la mayor cantidad de datos posible con el propósito de tener un mayor factor de seguridad.

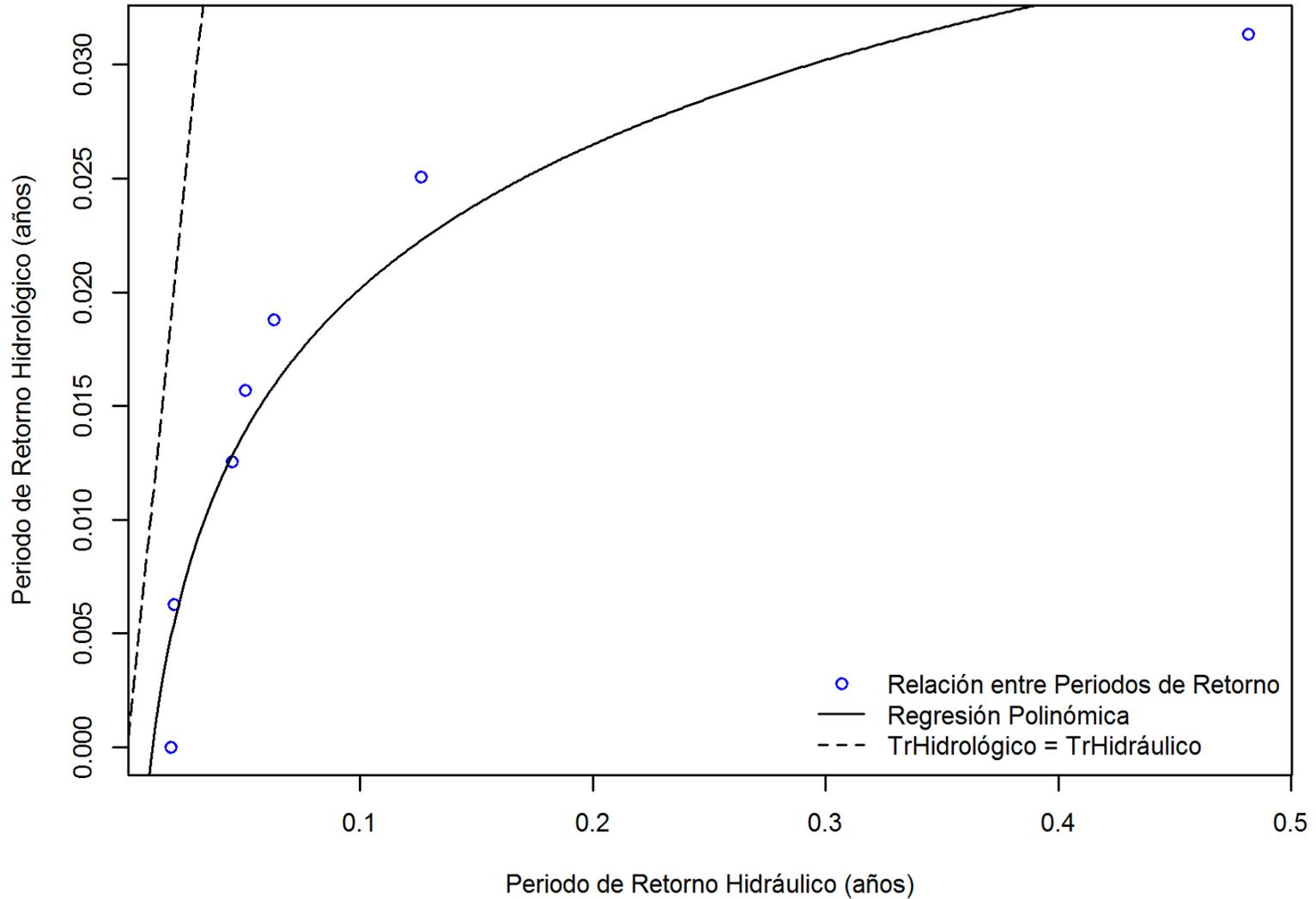


Ilustración 19. Periodo de retorno hidrológico contra periodo de retorno hidráulico. Fuente: Presentación propia de los autores

Se encontró que la relación existente entre ambas variables corresponde a una regresión de tipo logarítmica, la cual está representada por siguiente expresión matemática:

$$T_{R_{Hidrológico}} = A \log T_{R_{hidráulico}} + Z \quad (9)$$

Se realizó la calibración del modelo y se determinaron los valores de A y Z los cuales corresponden a 0.009 y 0.041 respectivamente.

Se observa que un evento de precipitación con determinado periodo de retorno hidrológico no genera que el periodo de retorno hidráulico en el sistema de alcantarillado pluvial sea el mismo. Se requiere un mayor periodo de retorno hidrológico para obtener la misma respuesta hidráulica en la red pluvial de alcantarillado.

En la Ilustración 19 la línea punteada representa la bisectriz y se nota claramente que un periodo de retorno hidrológico no corresponde al mismo periodo de retorno hidráulico.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La metodología implementada utilizó series de lluvias reales con una resolución horaria durante un periodo de un año. Se puede considerar que esta es una aproximación más afín a la realidad en comparación con investigaciones anteriormente realizadas las cuales suponen lluvia uniforme sobre toda la subcuenca o hacen uso de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Esta suposición puede representar un comportamiento hidrológico más certero. Sin embargo se recomienda hacer uso de series de lluvia con un registro de más de un año.

Dicha metodología hizo uso de dos estaciones de precipitación cuyas áreas de afectación eran muy variables y fueron tenidas en cuenta. Esto permitió recrear posibles escenarios hidrológicos sobre la subcuenca de estudio. No obstante, es recomendable tener en cuenta más de dos estaciones pluviométricas en futuras investigaciones.

En el método implementado para el desarrollo del presente trabajo de grado se usaron modelaciones de Montecarlo para tener en cuenta la variabilidad del coeficiente de escorrentía en la probabilidad de inundación de sistema de alcantarillado pluvial de la subcuenca en consideración teniendo en cuenta rangos establecidos por investigaciones previas. Esto permitió reducir en medida la variabilidad de la escorrentía entrante al sistema. Pese a ello se supuso que no se generaba infiltración como producto de la precipitación. Por lo tanto, se recomienda tener en cuenta la implicación de este parámetro en futuros trabajos a realizar.

En la metodología propuesta se tuvo en cuenta la variabilidad de los coeficientes de rugosidad de Manning, las pendientes y los diámetros. Esto permitió tener en cuenta distintas variables que intervienen en la determinación de la probabilidad de inundación. A pesar de esto, los rangos de valores de coeficiente de rugosidad de Manning utilizados para tuberías en ladrillo y gres se basaron en el RAS-2000 y no en resultados de investigaciones puntuales para la red de alcantarillado de la subcuenca El Salitre, a diferencia del concreto y el PVC. Consecuentemente se recomienda estudiar rangos de valores de coeficiente de rugosidad de Manning para tuberías en ladrillo y gres que

correspondan a la realidad de la red de alcantarillado de la subcuenca El Salitre.

En cuanto a las áreas aferentes a las tuberías se utilizó la generación de polígonos de Thiessen. Esta metodología representó una simplificación práctica para tener en cuenta en el modelo hidrológico que desarrolla EPA-SWMM. No obstante, esto representa el verdadero comportamiento de escorrentía que se produce en la subcuenca El Salitre. Por lo tanto se sugiere tener en cuenta levantamientos topográficos que permitan trazar áreas de aferencia que correspondan más a la realidad.

Por otro lado, la investigación desarrollada únicamente tuvo en cuenta una subcuenca de las 13 que pertenecen a la cuenca El Salitre en la ciudad de Bogotá. Esto permitió un análisis minucioso y con gran detalle de la zona de interés. Sin embargo, el análisis supuso que no había aportes de caudal de las otras subcuencas adyacentes que pudieran afectar la probabilidad de inundación. Por ello es recomendable tener en cuenta todas las subcuencas que pertenecen a la cuenca El Salitre y la interacción existente entre ellas en futuras investigaciones.

La metodología implementada para el análisis hidráulico e hidrológico está basada en un código desarrollado por los autores. Este programa permitió realizar una gran cantidad de cálculos e interacciones entre distintos softwares que se usaron para determinar la confiabilidad de inundación del sistema de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre. Se sugiere realizar una optimización de dicho código de manera que se reduzcan los tiempos de cálculo de las modelaciones.

Dentro de las herramientas usadas se encuentran los computadores. Dichos equipos tienen bajas especificaciones técnicas, lo cual dificulta en gran medida realizar un análisis con una mayor cantidad de simulaciones como consecuencia de la cantidad de registros de precipitación manejados. Por lo tanto, se recomienda hacer uso de máquinas de trabajo más potente y a la vez tener en cuenta una mayor cantidad de simulaciones.

De los resultados obtenidos en cuanto a la relación entre el periodo de retorno hidrológico y el periodo de retorno hidráulico se observa que un periodo de retorno hidrológico no supone el mismo periodo de retorno hidráulico. Se determinó que existe una relación logarítmica entre

ambas variables y está representada mediante la siguiente ecuación: $T_{\text{Rhidrológico}} = 0.009 \log (T_{\text{Rhidráulico}}) + 0.041$. Con esta expresión establecida se demuestra que el supuesto de diseño de los sistemas convencionales de alcantarillado de aguas lluvias de suponer periodos de retorno hidráulicos equivalente a los hidrológicos no es completamente cierto puesto que un periodo de retorno hidráulico requiere un periodo de retorno hidrológico mucho mayor para generar el mismo impacto dentro de la red de tuberías. Como consecuencia se tiene que muy probablemente los sistemas de alcantarillados pluviales se están sobredimensionando. Esto genera grandes costos de diseño y construcción así como un menor desempeño de los sistemas de alcantarillado.

De los resultados obtenidos se puede concluir que la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre en la ciudad de Bogotá presenta una baja probabilidad de inundación en términos generales. Esto implica un bajo mantenimiento por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) puesto que son pocos los tramos de tubería que requieren atención. Además también sugiere que la red se encuentra sobredimensionada. Se recomienda que la EAAB preste atención a los tramos presentados en la Ilustración 13 y tome medidas correctivas reemplazándolos por tuberías con diámetros internos mayores.

Según los periodos de retorno hidráulicos calculados se observa que en su mayoría la red de alcantarillado pluvial de la subcuenca El Salitre requiere valores relativamente elevados para presentar inundación. Esto puede ser considerado como otro factor que indica un sobredimensionamiento de dicha red.

De la prueba de Kruskal-Wallis realizada se obtuvo que entre el diámetro, el coeficiente de rugosidad de Manning, la pendiente y el coeficiente de escorrentía el parámetro que genera mayor probabilidad de inundación en los sistemas de alcantarillado pluvial es el diámetro. Por lo tanto, se sugiere tener en cuenta esta variable de manera prioritaria en diseños, optimizaciones y diagnósticos de sistemas de alcantarillados de aguas lluvias en futuras investigaciones.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Torres A., Sandoval S., Navarro K., Pulido L.M. (2011). Strategies of maintenance in storm sewers in Bogota (Colombia) using estimates of operational and flooding reliabilities. *International Conference on Urban Drainage*. Porto Alegre Brazil .
- Walpole Ronald E. (1999). *Probabilidad y estadística para Ingenieros*. Mexico: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.
- Bentley. (28 de Mayo de 2014). <http://www.bentley.com/es-MX/Products/SewerGEMS/Top-Reasons.htm>. Recuperado el 28 de Mayo de 2014, de <http://www.bentley.com/es-MX/Products/SewerGEMS/Top-Reasons.htm>: <http://www.bentley.com/es-MX/Products/SewerGEMS/Top-Reasons.htm>
- Brodie, I. M. (2013). Rational Monte Carlo method for flood frequency analysis in urban catchments. *Journal of Hidrology*.
- Mein, Russell G., and Curtis L. Larson. (1973). Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, 384-394.
- Múrcia Balaguer, A. (2011). Estudio de la cuenca de la Riereta en Sant Boi de Llobregat mediante un modelo de drenaje dual utilizando SWMM 5.0 .
- Oviedo Escobar, N. (2012). *Estudio de la atenuación de la escorrentía en techos verdes en Altos de Cazuca, Soacha*. Bogota.
- Paradis, E. (2003). R para Principiantes . *Institut des Sciences de l'Evolution, Universit Montpellier II*, 4-5.

- R. Ashley, S. Garvin, E. Pasche, A. Vassilopoulos, C. Zevenbergen. (2007). *Advances in urban flood management* . *Taylor & Francis Group*.
- Rossman, L. A. (2010). *STORM WATER MANAGEMENT MODEL USER'S MANUAL* .
- Sandoval Santiago, Torres Andrés, Navarro Karen. (2011). Metodología para el cálculo de la confiabilidad de inundación, teniendo en cuenta incertidumbres en las diferentes variables influyentes.
- Santiago Sandoval, Andres Torres, Karen P Navarro. (2013). "Capítulo 3 - Estimación de la confiabilidad de inundación en alcantarillados pluviales de Bogotá mediante métodos de generación aleatoria" *Sociedad Y Servicios Ecosistémicos: Perspectivas Desde La Gestión del Agua, Las Inundaciones y El Saneamiento*. Centro Editorial de la Universidad del Valle.
- Santiago Sandoval, Andres Torres, Nelson Obregón . (2012). Herramientas para la implementación y mantenimiento proactivo en alcantarillados urbanos utilizando la confiabilidad de inundación y conceptos de entropía de información. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 152-166.
- Torres Abello, A. E. (2004). *Apuntes de clase sobre HIDROLOGÍA URBANA*. Bogota: Pontificia Universidad Javeriana.
- Zapata García Héctor Ovidio, Torres Andrés. (2011). Inundación en barrios de invasión urbana: un enfoque basado en la confiabilidad. *Evento: XIX Seminario nacional de hidraulica e hidrologia y el Foro nacional sobre seguridad de embalses*.

- Sandoval Santiago, Navarro Karen. (2010). Estrategias de mantenimiento en alcantarillados pluviales utilizando estimaciones de confiabilidad operativa
- Universidad Militar Nueva Granada. (2010). POMCA Salitre, convenio SDA – UMNG.
- Copete R, James A. (2013). Informe técnico sobre estaciones con registro de precipitaciones en la sabana de Bogotá pertenecientes a la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), Pontificia Universidad Javeriana. Maestría en Hidrosistemas. Grupo de investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente.
- Walpole, Ronald E., Raymond H. Myers, Sharon L. Myers, and Keying Ye. 2006. Probability & Statistics for Engineers & Scientists. 8th ed. Prentice Hall.
- Chow, Ven Te, David R. Maidment, and Larry W. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. Bogotá: Mc Graw Hill.
- In-Hyeok Park, Jeong-Yong Lee, Ji-Heon Lee and Sung-Ryong Ha. (2014). Evaluation of the causes of inundation in a repeatedly flooded zone in the city of Cheongju, Korea, using a 1D/2D model.

6 LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1: código para lectura de "red semilla" y generación de simulaciones.
- Anexo 2: código para análisis de resultados de las simulaciones realizadas.
- Anexo 3: variables generadas mediante modelaciones de Montecarlo.
- Anexo 4: datos de precipitación estaciones seleccionadas.

ANEXO 1: Código para lectura de "red semilla" y generación de simulaciones.

```
setwd("K:/u/TESIS/Mayo29")  
rm(list=ls(all=TRUE))
```

```
NS=1000
```

```
porcentaje_variacion_diametro=0.005#equivale al 0.5% el  
corresponde al 1% que recomienda la EAB para alcantarillado pluvial  
de Bogota
```

```
pruebe3=readLines("Red_Semilla.inp")  
pruebe4=read.delim("Red_Semilla.inp",header=FALSE,  
sep="",quote="\",dec=".",stringsAsFactors=FALSE)
```

```
cantidad_subcuencas_para_coordenadas=246  
filastopologiacuencas=1732  
filastopologiatuberias=1970  
filastopologiapozos=1734  
nuevo_archivo_SWMM=pruebe3  
Name=matrix(0,nrow=filastopologiacuencas,ncol=1)  
Outlet=matrix(0,nrow=filastopologiacuencas,ncol=1)  
TotalArea=matrix(0,nrow=filastopologiacuencas,ncol=1)  
Pcnt.Imperv=matrix(0,nrow=filastopologiacuencas,ncol=1)  
n.manning=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)  
n.manning_inicial=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)  
NameConduits=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)  
InletNode=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)  
OutletNode=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)  
LenghtConduits=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)  
Junctions=matrix(0,nrow=filastopologiapozos,ncol=1)  
InletOffset=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)  
Raingage=matrix(0,nrow=filastopologiacuencas,ncol=1)  
Geom1=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)  
Pendiente=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)
```

```
estacion_lluvia_que_le_toca_a_cada_tuberia=matrix(0,nrow=filastopolo  
giatuberias,ncol=1)
```

```
Coordenada_x_estacion_1=341647.569#valor en X de la estacion San  
Luis
```

```
Coordenada_y_estacion_1=345726.919#valor en Y de la estacion San  
Luis
```

```
Maxima_distancia_barrido_estacion_1=45322.824829#valor medido en  
ArcGIS desde la estacion San Luis
```

```
#Se lee el archivo inicial de epaswmm
```

```
FIN=67-3
```

```
FTN=6990-3
```

```
j=1
```

```
k=0
```

```
while(j<=nrow(Name))
```

```
{
```

```
  while(k<=FTN)#Realiza saltos de cada 4 filas en la matriz pruebe4
```

```
  {
```

```
    Name[j,1]=pruebe4[FIN+k,1]
```

```
    k=k+4
```

```
    j=j+1
```

```
  }#termina while que realiza saltos de cada 4 filas en la matriz pruebe4
```

```
}
```

```
#View(Name)
```

```
#Se leen los nombres de las subcuencas
```

```
FIO=68-3
```

```
FTO=6991-3
```

```
n=1
```

```
o=0
while(n<=nrow(Outlet))
{
  while(o<=FTO)#Realiza saltos de cada 4 filas en la matriz pruebe4
  {
    Outlet[n,1]=pruebe4[FIO+o,1]
    o=o+4
    n=n+1
  }#termina while que realiza saltos de cada 4 filas en la matriz pruebe4
}
#View(Outlet)
```

#Se leen las areas de las subcuencas

```
FIA=68-3
FTA=6992-3
```

```
p=1
q=0
while(p<=nrow(TotalArea))
{
  while(q<=FTA)#Realiza saltos de cada 4 filas en la matriz pruebe4
  {
    TotalArea[p,1]=as.numeric(pruebe4[FIA+q,2])
    q=q+4
    p=p+1
  }#termina while que realiza saltos de cada 4 filas en la matriz pruebe4
}
#View(TotalArea)
```

#Se leen los nombres de las tuberias

```
FINC=22738-3
FTNC=40923-3
```

```
r=1
s=0
while(r<=nrow(NameConduits))
{
  while(s<=FTNC)#Realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
  {
    NameConduits[r,1]=pruebe4[FINC+s,1]
    s=s+5
    r=r+1
  }#termina while que realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
}
#View(NameConduits)

#Se leen los pozos aguas arriba de las tuberias

FIIN=22738-3
FTIN=32833-3
t=1
u=0
while(t<=nrow(InletNode))
{
  while(u<=FTIN)#Realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
  {
    InletNode[t,1]=pruebe4[FIIN+u,2]
    u=u+5
    t=t+1
  }#termina while que realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
}
#View(InletNode)

#Se leen los pozos aguas abajo de las tuberias

FION=22733-3
FTON=32834-3
v=1
```

```
w=0
while(v<=nrow(OutletNode))
{
  while(w<=FTON)#Realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
  {
    OutletNode[w,1]=pruebe4[FION+v,1]
    v=v+5
    w=w+1
  }#termina while que realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
}
#View(OutletNode)

#Se leen las longitudes de las tuberias

FILC=22733-3
FTLC=32834-3
x=1
y=0
while(x<=nrow(LenghtConduits))
{
  while(y<=FTLC)#Realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
  {
    LenghtConduits[y,1]=as.numeric(pruebe4[FILC+x,2])
    x=x+5
    y=y+1
  }#termina while que realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
}
#View(LenghtConduits)

#Se leen los coeficientes de manning iniciales de cada tuberia

FINM=22740-3
FTNM=32835-3
b=1
```

```
z=0
while(b<=nrow(n.manning))
{
  while(z<=FTNM)#Realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
  {
    n.manning_inicial[b,1]=pruebe4[FINM+z,1]
    z=z+5
    b=b+1
  }#termina while que realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
}
#View(n.manning_inicial)

#Se leen los diametros de las tuberias
FIDC=32845
FTDC=40921
bb=1
ba=0
while(ba<=nrow(Geom1))
{
  while(bb<=FTDC)#Realiza saltos de cada 4 filas en la matriz pruebe4
  {
    Geom1[bb,1]=as.numeric(pruebe4[FIDC+ba,1])
    ba=ba+4
    bb=bb+1
  }#termina while que realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
}
#View(Geom1)

#Se leen los nombres de los pozos del sistema
FINP=17411-3
FTNP=22610-3
d=1
e=0
```

```
while(d<=nrow(Junctions))
{
  while(e<=FTNP)#Realiza saltos de cada 3 filas en la matriz pruebe4
  {
    Junctions[d,1]=pruebe4[FINP+e,1]
    d=d+1
    e=e+3
  }#termina while que realiza saltos de cada 3 filas en la matriz pruebe4
}
#View(Junctions)

#Se leen los nombres de las subcuencas del sistema respecto a las
coordenadas y trabajar con la variacion de la afectacion de las
estaciones
FICP=76758#fila en donde comienzan los nombres de las subcuencas
FTCP=104176
cantidad_vertices_sistema_subcuencas=(FTCP-FICP)/2+1
Subcatchment=matrix(0,nrow=cantidad_vertices_sistema_subcuencas,n
col=1)
f=1
g=0
while(f<=cantidad_vertices_sistema_subcuencas)
{
  while(g<=FTCP)#Realiza saltos de cada 2 filas en la matriz pruebe4
  {
    Subcatchment[f,1]=pruebe4[FICP+g,1]
    f=f+1
    g=g+2
  }#termina while que realiza saltos de cada 2 filas en la matriz pruebe4
}
#View(Subcatchment)
```

```
#Se almacena una coordenada en X,Y representativa para cada
subcuenca tomando las coordenadas X,Y de un solo vertice que
compone el poligono que representa cada microcuenca
FICP=76758#fila en donde comienzan los nombres de las subcuencas
FTCP=104176#Reutilizo las variables:FICP,FTCP
aa=2#comenzare a llenar con el bucle a partir de la segunda casilla
porque la primera coordenada ya se llena pero no con bucle sino
directamente
ab=0
ac=2
Coordenada_representativa_por_cuenca=matrix(0,filastopologiacuencas
,ncol=2)
Coordenada_representativa_por_cuenca[1,2]=as.numeric(pruebe4[FICP
+1,1])
Coordenada_representativa_por_cuenca[1,1]=as.numeric(pruebe4[FICP
,2])
while(ac<=filastopologiacuencas)
{
  if(Subcatchment[aa,1]!=Subcatchment[aa-1,1])
  {

    Coordenada_representativa_por_cuenca[ac,2]=as.numeric(pruebe
4[FICP+ab+1,1])#Mas 1 porque la coordenada Y esta en la fila inferior
del nombre

    Coordenada_representativa_por_cuenca[ac,1]=as.numeric(pruebe
4[FICP+ab,2])
    ac=ac+1
  }

  aa=aa+1
  ab=ab+2

}
#View(Coordenada_representativa_por_cuenca)
```

```
CT=filastopologiatuberias#antes tenia 2007 tuberias
pimin=45#porcentaje de impermeabilizacion minimo para la subcuenca
El Salitre basado en Sandoval
pimax=70#porcentaje de impermeabilizacion maximo para la subcuenca
El Salitre basado en Sandoval
nminconcreto=0.011
nmaxconcreto=0.017
nminpvc=0.010
nmaxpvc=0.015
nmingres=0.011
nmaxgres=0.015
nminladrillo=0.013
nmaxladrillo=0.017
nmin=0
nmax=0
```

```
matriz_radio_alcance_lluvia_estacion_san_luis=matrix(0,nrow=NS,ncol
=1)#matriz en donde se almacena el radio de alcance de la lluvia de
cada estacion en cada simulacion
```

```
matriz_diametros_simulaciones=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,n
col=NS)
matriz_n_manning_simulaciones=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,
ncol=NS)
matriz_pendientes_simulaciones=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,
ncol=NS)
matriz_estacion_pluviometrica_simulaciones=matrix(0,nrow=filastopolo
giatuberias,ncol=NS)
matriz_coeficientes_escorrentia_simulaciones=matrix(0,nrow=filastopol
ogiacuencas,ncol=NS)
```

```
a=1
while(a<=NS)
{
```

```
matrizpi=matrix(runif(filastopologiacuencas*NS,pimin,pimax),filastopolo
giacuencas,NS)
```

```
vectorhorizontalpi=as.vector(matrizpi)
```

```
vectorverticalpi=cbind(vectorhorizontalpi)
```

```
Pcnt.Imperv=vectorverticalpi
```

```
Corrida1=which(match(nuevo_archivo_SWMM,"[SUBCATCHMENTS]",no
match=0)==1)+4
```

```
Corrida2=which(match(nuevo_archivo_SWMM,"[CONDUITS]",nomatch=
0)==1)+4
```

```
Corrida3=which(match(nuevo_archivo_SWMM,"[XSECTIONS]",nomatch
=0)==1)+3
```

```
#Se crea la matriz en donde se almacena el delta x, el delta y, la raiz de
la diferencia al cuadrado de delta x, delta y
(dx,dx,h=((dx)^2+(dy)^2)^0.5)
```

```
matriz_barrido_lluvia=matrix(0,filastopologiacuencas,ncol=4)
```

```
Coordenada_x_estacion_1
```

```
Coordenada_y_estacion_1
```

```
distancia_minima_estacion_a_subcuencas=0
```

```
distancia_aleatoria_estacion_a_subcuencas=runif(1,distancia_minima_e
stacion_a_subcuencas,Maxima_distancia_barrido_estacion_1)
```

```
ad=1
```

```
while(ad<=filastopologiacuencas)
```

```
{
```

```
    matriz_barrido_lluvia[ad,1]=Coordenada_x_estacion_1 -
Coordenada_representativa_por_cuenca[ad,1]#xest-xi
```

```
    matriz_barrido_lluvia[ad,2]=Coordenada_y_estacion_1 -
Coordenada_representativa_por_cuenca[ad,2]#yest-yi
```

```

matriz_barrido_lluvia[ad,3]=((matriz_barrido_lluvia[ad,1])^2 +
(matriz_barrido_lluvia[ad,2])^2)^0.5#h=((dx)^2+(dy)^2)^0.5

if(matriz_barrido_lluvia[ad,3] <=
distancia_aleatoria_estacion_a_subcuencas)
{
matriz_barrido_lluvia[ad,4]=1
}
else
{
matriz_barrido_lluvia[ad,4]=2
}

ad=ad+1
}

```

```

#Se crea la matriz de valores aleatorios para los InletOffset de los pozos
h=1
altura_minima_batea_en_pozo=0
altura_maxima_batea_en_pozo=0.75#75 centimetros segun el RAS

```

```

while(h<=filastopologiatuberias)
{
A=which(Junctions==InletNode[h,1])
InletOffset[h]=runif(1,altura_minima_batea_en_pozo,altura_maxi
ma_batea_en_pozo)

h=h+1
A=0
}

```

```

#Calculo las pendientes de cada tuberia para la simulacion en cuestion

```

```

ca=1
OutletOffset=0#valor de cero porque no vario el outlet offset, lo que
vario es el inlet offset, por eso si existe la matriz de inlet offset y no
existe matriz de outlet offset
while(ca<=filastopologiatuberias)
{
    Pendiente[ca,1]=abs(InletOffset[ca,1]-
OutletOffset)/((LenghtConduits[ca,1])^2-(InletOffset[ca,1]-
OutletOffset)^+2)^0.5#m=dy/dx=dy/((L)^2-
(dy)^2)^0.5=abs(inletoffset-outletoffset)/((Length)^2-(inletoffset-
outletoffset)^2)^0.5
ca=ca+1
}

#Calculo los diametros aleatorios de cada tuberia
#Diametros_minimos=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)
#Diametros_maximos=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)
Diametros_aleatorios=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)

#Diametros_minimos=Geom1-Geom1*porcentaje_variacion_diametro
#Diametros_maximos=Geom1+Geom1*porcentaje_variacion_diametro

gg=1
while(gg<=filastopologiatuberias)
{
    Diametros_aleatorios[gg,1]=rnorm(1,Geom1[gg,1],porcentaje_va
riacion_diametro)
gg=gg+1
}
#View(Diametros_aleatorios)

#Se asigna la lluvia (estacion pluviometrica) que le toca a cada tuberia
da=1
while(da<=filastopologiatuberias)

```

```
{  
  lluvia=which.min(Outlet==InletNode[da,1])  
  estacion_lluvia_que_le_toca_a_cada_tuberia[da,1]=matriz_barrido_lluvia[lluvia,4]  
  da=da+1  
}
```

```
matrizpi=matrix(runif(CT*NS,pimin,pimax),CT,NS)  
vectorhorizontalpi=as.vector(matrizpi)  
vectorverticalpi=cbind(vectorhorizontalpi)
```

```
n.manning=matrix(0,nrow=CT,ncol=1)
```

```
d=1  
while(d<=nrow(n.manning))  
{  
  if(n.manning_inicial[d,1]==0.013)  
  {  
    nmin=nminconcreto  
    nmax=nmaxconcreto  
    if(n.manning_inicial[d,1]==0.01)  
    {  
      nmin=nminpvc  
      nmax=nmaxpvc  
      if(n.manning_inicial[d,1]==0.012)  
      {  
        nmin=nmingres  
        nmax=nmaxgres  
      }  
      if(n.manning_inicial[d,1]==0.014)  
      {  
        nmin=nminladrillo  
        nmax=nmaxladrillo
```

```

    }
  }
}

n.manning[d,1]=runif(1,nmin,nmax)

d=d+1
}

i=48
while(i-47<=filastopologiacuencas)
{
  nuevo_archivo_SWMM[i]=paste(Name[i-(Corrida1-1),1],"
",matriz_barrido_lluvia[i-(Corrida1-1),4],"    ",Outlet[i-(Corrida1-1),1],"
",TotalArea[i-(Corrida1-1),1],sep="    ",Pcnt.Imperv[i-(Corrida1-1),1],"
0    0    0    ")
  i=i+1
}

c=7051 #la fila en donde comienza la informacion de las tuberias en
pruebe3 es 7051
while(c-7050<=filastopologiatuberias)
{
  nuevo_archivo_SWMM[c]=paste(NameConduits[c-(Corrida2-1),1],"
",InletNode[c-(Corrida2-1),1],"          ",OutletNode[c-(Corrida2-1),1],"
",LenghtConduits[c-(Corrida2-1),1],sep="          ",n.manning[c-(Corrida2-
1),1],"          ",InletOffset[c-(Corrida2-1),1],"          0    0    0
")
  c=c+1
}

gt=9075 #fila en donde comienza la informacion de los diametros de
las tuberias en pruebe3

```

```

while(gt<=filastopologiatuberias)
{
nuevo_archivo_SWMM[gt]=paste(NameConduits[gt-(Corrida3-1),1],"
","CIRCULAR","      ",Diametros_aleatorios[gt-(Corrida3-1),1],"      ","
0      0      0      1      ")
gt=gt+1
}

```

```

write(nuevo_archivo_SWMM,file=paste("Simulacion",as.character(a),".in
p",sep=""))

```

```

system(paste("swmm5      ", "Simulacion",as.character(a),".inp
",sep="","Resultados",as.character(a),".inp"),wait=TRUE)

```

```

resul=readLines(con=paste("Resultados",as.character(a),".inp",sep=""))

```

```

matriz_radio_alcance_lluvia_estacion_san_luis[a,1]=distancia_aleatoria
_estacion_a_subcuencas

```

```

matriz_n_manning_simulaciones[,a]=n.manning
matriz_pendientes_simulaciones[,a]=Pendiente
matriz_estacion_pluviometrica_simulaciones[,a]=estacion_lluvia_que_le
_toca_a_cada_tuberia
matriz_diametros_simulaciones[,a]=Diametros_aleatorios

```

```

a=a+1
}

```

```

write(matriz_n_manning_simulaciones,file=paste("n",".txt",sep=""),ncol
umns=NS)

```

```

write(matriz_pendientes_simulaciones,file=paste("So",".txt",sep=""),nc
olumns=NS)

```

```

write(matriz_estacion_pluviometrica_simulaciones,file=paste("E",".txt",s
ep=""),ncolumns=NS)

```

```
write(matriz_diametros_simulaciones,file=paste("D",".txt",sep=""),ncol=
mns=NS)
```

```
#-----
#-----
#-----
#-----
#ANALISIS DE RESULTADOS      ANALISIS DE RESULTADOS
      ANALISIS DE RESULTADOS
#-----
#-----
#-----
#-----
```

```
#Se cuentan las veces que la relación Ymax/D dio 1 (es decir, que se
inundo la tubería) de cada simulación para todas las tuberías del
sistema
```

```
Inundacion=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=NS)
```

```
ea=1
```

```
REPORT_STEP=53#cantidad de resultados de una simulación que arroja
EpaSWMM, que corresponde a 53 porque es un resultado por semana
```

```
while(ea<=NS)
```

```
{
```

```
Archivo_de_resultados_a_leer=as.character(paste("Resultados",as.char
acter(ea),".inp",sep=""))
```

```
#View(Archivo_de_resultados_a_leer)
```

```
matriz_resultados=read.table(Archivo_de_resultados_a_leer,header=F,fi
ll=T,sep="")
```

```

matriz_que_contienen_la_palabra_velocity=which(matriz_resultados==
"Velocity",arr.ind=TRUE)
fila_minima_para_trabajar=as.numeric(matriz_que_contienen_la_palabra_
a_velocity[1,1])-5

#CUENTO LA CANTIDAD DE VECES QUE SE INUNDO CADA TUBERIA EN
UNA SIMULACION
ec=1
while(ec<=nrow(matriz_resultados)-fila_minima_para_trabajar)
{

    if(is.na(match(as.character(matriz_resultados[ec+fila_minima_par
a_trabajar,3]),NameConduits))==FALSE)
        {

            fila_en_matriz_NameConduits=which(NameConduits==matriz_res
ultados[ec+fila_minima_para_trabajar,3])
            ed=ec+5
            ef=0
            while(ef+1<=REPORT_STEP)
            {

                if(as.numeric(as.character(matriz_resultados[ed+ef+fila_minima_
para_trabajar,6]))==100)
                    {

                        Inundacion[fila_en_matriz_NameConduits,NS]=Inundacion[fila_en
_matriz_NameConduits,NS]+1
                    }
                ef=ef+1
            }

        }

}

```

```

ec=ec+1
}
#View(Inundacion)

ea=ea+1
}
write(Inundacion,file=paste("Inundacion",".txt",sep=""),ncolumns=NS)

```

```

#CALCULO DE LA PROBABILIDAD DE INUNDACION, en donde
probabilidad de inundacion=numero total de semanas en que la altura
de la lámina de agua superó el diámetro / (REPORT_STEP*NS)
Lamina_agua_supero_diametro=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,n
col=1)#vector en el que se guardan el numero total de semanas (de las
53*NS) en que la altura de la lamina de agua supera al diametro
xa=1#recorre la matriz de manera VERTICAL
while(xa<=filastopologiatuberias)
{
    Lamina_agua_supero_diametro[xa,1]=sum(Inundacion[xa,])
    xa=xa+1
}
#View(Lamina_agua_supero_diametro)

```

```

Probabilidad_inundacion=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)
ya=1
while(ya<=filastopologiatuberias)
{
    Probabilidad_inundacion[ya,1]=Lamina_agua_supero_diametro[ya
,1]/(REPORT_STEP*NS)
    ya=ya+1
}
View(Probabilidad_inundacion)

```

```

Probabilidad_inundacion_en_porcentaje=100*Probabilidad_inundacion
View(Probabilidad_inundacion_en_porcentaje)

```

```
write(Probabilidad_inundacion,file=paste("Probabilidad_inundacion", ".txt",
",sep=""),ncolumns=1)
```

CALCULO DEL PERIODO DE RETORNO DE INUNDACION

```
Nme=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)#numero medio de
eventos que pueden ocurrir en un agno determinado para la tubería "i"
```

```
za=1
while(za<=filastopologiatuberias)
{
    Nme[za,1]=Probabilidad_inundacion[za,1]*REPORT_STEP
    za=za+1
}
```

```
Tr=matrix(1,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)#matriz de los
periodos de retorno. Creo la matriz y la lleno de "1" en vez de "0"
porque para los casos en que "Nme=" sea igual a 0 entonces no se
puede decir que el periodo de retorno es infinito sino que es mayor a 1
agno
```

```
zb=1
while(zb<=filastopologiatuberias)
{
    if(Nme[zb,1]!=0)
    {
        Tr[zb,1]=1/Nme[zb,1]
    }
    zb=zb+1
}
View(Tr)
write(Tr,file=paste("Tr", ".txt", sep=""),ncolumns=1)
```

```
#LIBRERIA DE VARIABLES
```

```
#-----
-----
```

```
#Son
contadores=i,j,k,n,o,p,q,a,r,s,t,u,v,w,x,y,b,d,e,h,f,g,aa,ab,ac,ad,ba,bb,c
a,da,ea,ec,ed,ef,eg,eh
#pruebe3=archivo de caracteres de lineas de la topologia de SWMM
#nuevo_archivo_SWMM=archivo que copia a pruebe3 para ser
modificado y correrlo en SWMM
#pruebe4=matriz que lee el modelo inicial de SWMM con la topologia.
Lo lee en dos columnas. De esta matriz se leen todos los datos
#FIN=fila de la matriz pruebe4 en donde inician las numeraciones que
SWMM asigna a las subcuencas
#FTN=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan las numeraciones
que SWMM asigna a las subcuencas
#FIO=fila de la matriz pruebe4 en donde inician de los nombres de las
subcuencas que asigno GEMS
#FTO=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan de los nombres de
las subcuencas que asigno GEMS
#FIA=fila de la matriz pruebe4 en donde inician las areas de las
subcuencas que asigno GEMS
#FTA=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan las areas de las
subcuencas que asigno GEMS
#FINC=fila de la matriz pruebe4 en donde inician los nombres de los
conductos
#FTNC=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan los nombres de los
conductos
#FIIN=fila de la matriz pruebe4 en donde inician los inlet nodes
#FTIN=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan los inlet nodes
#FION=fila de la matriz pruebe4 en donde inician los outlet nodes
#FTON=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan los outlet nodes
#FILC=fila de la matriz pruebe4 en donde inician los Lenght Conduits
#FTLC=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan los Lenght Conduits
#FINM=fila de la matriz pruebe4 en donde inician los n de manning
#FTNM=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan los n de manning
#FIDC=fila de la matriz pruebe4 en donde inician los diametros de las
tuberias (Diametro=Geom1)
#FTDC=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan los diametros de
las tuberias (Diametro=Geom1)
```

#FINP=fila de la matriz pruebe4 en donde inician los nombres de los pozos
#FTNP=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan los nombres de los pozos
#FICP=fila de la matriz pruebe4 en donde inician las coordenadas en Y de los poligonos de las subcuencas
#FTCP=fila de la matriz pruebe4 en donde terminan las coordenadas en Y de los poligonos de las subcuencas
#c=FILA DONDE INICIA LA PALABRA "[CONDUITS]"
#filastopologiacuencas=cantidad de filas que contienen la topologia de las subcuencas
#filastopologiatuberias=cantidad de tuberias en la red
#filastopologiapozos=cantidad de pozos en la red
#nuevo_archivo_SWMM=nuevo archivo que se genera con las modificaciones realizadas de SWMM para correr
#Name=matriz de la numeracion que SWMM asigna a las subcuencas
#Outlet=matriz de los nombres de las subcuencas que asigno GEMS
#TotalArea=matriz con las areas de las subcuencas que asigno GEMS
#Pcnt.Imperv=matriz de los porcentajes de impermeabilizacion de las subcuencas
#Raingage=matriz de las estaciones pluviometricas asociadas a cada subcuenca
#NameConduits=matriz de los nombres de las tuberias
#InletNode=matriz con los pozos aguas arriba de las tuberias
#OutletNode=matriz con los pozos aguas abajo de las tuberias
#LenghtConduits=matriz con las longitudes de las tuberias
#Geom1=matriz con los diametros de las tuberias
#Junctions=matriz con los nombres de los pozos del sistema
#n.manning=matriz de los n de manning de las tuberias
#resul=archivo que se genera con los resultados de la simulacion realizada con los cambios que se hicieron
#matrizpi=de valores aleatorios del porcentaje de impermeabilizacion
#vectorhorizontalpi=vector horizontal de la matrizpi
#vectorverticalpi=vector vertical del vectorhorizontalpi
#matrizn=de valores aleatorios del coeficiente de manning
#vectorhorizontaln=vector horizontal de la matrizn

#vectorverticaln=vector vertical del vectorhorizontaln
#Cantidad_tuberias_por_pozo=matriz que almacena la cantidad de tuberias que llegan (columna izquierda) y que salen (derecha) de un pozo
#altura_minima_batea_en_pozo=altura minima a la que puede estar conectada la batea de una tuberia a un pozo la cual es cero, es decir, conectada el fondo del pozo
#altura_maxima_batea_en_pozo==altura minima a la que puede estar conectada la batea de una tuberia a un pozo la cual son 75 centimetros segun el RAS titulo D, numeral D.6.4.1
#Coordenada_y_estacion_1=Coordenada en Y de la estacion 1
#Coordenada_y_estacion_2=Coordenada en Y de la estacion 2
#Maxima_distancia_barrido_estacion_1=maxima distancia que hay entre la estacion 1 y la coordenada de alguna subcuenca mas alejada, la cual corresponde a la maxima distancia para hacer el barrido para la estacion 1
#Maxima_distancia_barrido_estacion_2=maxima distancia que hay entre la estacion 2 y la coordenada de alguna subcuenca mas alejada, la cual corresponde a la maxima distancia para hacer el barrido para la estacion 2
#Coordenada_representativa_por_cuenca=matriz que almacena la coordenada en Y de un solo vertice de cada subcuenca
#cantidad_vertices_sistema_subcuencas=cantidad de vertices que tiene el sistema teniendo en cuenta todas las subcuencas del sistema
#matriz_barrido_lluvia=matriz en donde se almacena x_{est-xi} , y_{est-yi} , $h=((dx)^2+(dy)^2)^{0.5}$, la estacion pluviometrica que le toca a cada cuenca
#Diametros_minimos=matriz de los diametros del sistema del archivo semilla menos el porcentaje de variacion del diametro, propuesto primero de 10%
#Diametros_maximos=matriz de los diametros del sistema del archivo semilla mas el porcentaje de variacion del diametro, propuesto primero de 10%
#Diametros_aleatorios=matriz de los diametros aleatorios del sistema con rangos entre las matrices Diametros_minimos y Diametros_maximos

- **ANEXO 2:** Código para análisis de resultados de las simulaciones realizadas.

```

setwd("C:/Users/User/Desktop/REPORTES 1000 SIMULACIONES")
rm(list=ls(all=TRUE))

NS=1000
filastopologiatuberias=1970

pruebe4=read.delim("Red_Semilla.inp",header=FALSE,
sep="","",quote="\\"",dec=".",stringsAsFactors=FALSE)
NameConduits=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)
FINC=22738-3
FTNC=40923-3
r=1
s=0
while(r<=nrow(NameConduits))
{
  while(s<=FTNC)#Realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
  {
    NameConduits[r,1]=pruebe4[FINC+s,1]
    s=s+5
    r=r+1
  }#termina while que realiza saltos de cada 5 filas en la matriz pruebe4
}
#View(NameConduits)
write(NameConduits,file=paste("#Nombres_tuberias",".txt",sep=""),ncol
umns=1)

#Se cuentan las veces que la relación Ymax/D dio 1 (es decir, que se
inundo la tubería) de cada simulación para todas las tuberías del
sistema
Inundacion=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=NS)
ea=1

```

```
REPORT_STEP=53#cantidad de resultados de una simulacion que arroja  
EpaSWMM, que corresponde a 53 porque es un resultado por semana  
while(ea<=NS)
```

```
{
```

```
Archivo_de_resultados_a_leer=as.character(paste("Resultados",as.char  
acter(ea),".inp",sep=""))
```

```
#View(Archivo_de_resultados_a_leer)
```

```
matriz_resultados=read.table(Archivo_de_resultados_a_leer,header=F,fi  
ll=T,sep="")
```

```
matriz_que_contienen_la_palabra_velocity=which(matriz_resultados==  
"Velocity",arr.ind=TRUE)
```

```
fila_minima_para_trabajar=as.numeric(matriz_que_contienen_la_palabr  
a_velocity[1,1])-5
```

```
#CUENTO LA CANTIDAD DE VECES QUE SE INUNDO CADA TUBERIA EN  
UNA SIMULACION
```

```
ec=1
```

```
while(ec<=nrow(matriz_resultados)-fila_minima_para_trabajar)
```

```
{
```

```
    if(is.na(match(as.character(matriz_resultados[ec+fila_minima_par  
a_trabajar,3]),NameConduits))==FALSE)
```

```
    {
```

```
        fila_en_matriz_NameConduits=which(NameConduits==matriz_res  
ultados[ec+fila_minima_para_trabajar,3])
```

```
        ed=ec+5
```

```
        ef=0
```

```
        while(ef+1<=REPORT_STEP)
```

```
        {
```

```
            if(as.numeric(as.character(matriz_resultados[ed+ef+fila_minima_  
para_trabajar,6]))==100)
```

```
            {
```

```

        Inundacion[filas_en_matriz_NameConduits,ea]=Inundacion[filas_en
_matriz_NameConduits,ea]+1
    }
    ef=ef+1
}
}

```

```
ec=ec+1
```

```
}
```

```
#View(Inundacion)
```

```
ea=ea+1
```

```
}
```

```
write(Inundacion,file=paste("#Inundacion",".txt",sep=""),ncolumns=NS
)
```

```
#CALCULO DE LA PROBABILIDAD DE INUNDACION, en donde
probabilidad de inundacion=numero total de semanas en que la altura
de la lámina de agua superó el diámetro / (REPORT_STEP*NS)
```

```
Lamina_agua_supero_diametro=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,n
col=1)#vector en el que se guardan el numero total de semanas (de las
53*NS) en que la altura de la lamina de agua supera al diametro
```

```
xa=1#recorre la matriz de manera VERTICAL
```

```
while(xa<=filastopologiatuberias)
```

```
{
```

```
    Lamina_agua_supero_diametro[xa,1]=sum(Inundacion[xa,])
```

```
xa=xa+1
```

```
}
```

```
#View(Lamina_agua_supero_diametro)
```

```
Probabilidad_inundacion=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)
```

```
ya=1
```

```
while(ya<=filastopologiatuberias)
```

```
{
  Probabilidad_inundacion[ya,1]=Lamina_agua_supero_diametro[ya
,1]/(REPORT_STEP*NS)
ya=ya+1
}
#View(Probabilidad_inundacion)
```

```
Probabilidad_inundacion_en_porcentaje=100*Probabilidad_inundacion
#View(Probabilidad_inundacion_en_porcentaje)
```

```
write(Probabilidad_inundacion,file=paste("#Probabilidad_inundacion",".t
xt",sep=""),ncolumns=1)
```

```
#CALCULO DEL PERIODO DE RETORNO DE INUNDACION
```

```
Nme=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)#numero medio de
eventos que pueden ocurrir en un agno determinado para la tubería "i"
```

```
za=1
while(za<=filastopologiatuberias)
{
  Nme[za,1]=Probabilidad_inundacion[za,1]*REPORT_STEP
za=za+1
}
write(Nme,file=paste("#Nme",".txt",sep=""),ncolumns=1)
```

```
Tr=matrix(0,nrow=filastopologiatuberias,ncol=1)#matriz de los
periodos de retorno. Para los casos en que "Nme=" sea igual a 0
entonces no se puede decir que el periodo de retorno es infinito sino que
es mayor a 1 agno
```

```
zb=1
while(zb<=filastopologiatuberias)
{
  if(Nme[zb,1]!=0)
```

```
{  
    Tr[zb,1]=1/Nme[zb,1]  
}  
  
else  
{  
    Tr[zb,1]=">1"  
}  
zb=zb+1  
}  
#View(Tr)  
write(Tr,file=paste("#Trh",".txt",sep=""),ncolumns=1)
```