

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA UBICACIÓN DE PUNTOS DE
MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN
BAJO LOS PARÁMETROS DE LOS PLANES DE SEGURIDAD DEL AGUA**

**OMAR ANDRÉS BALLESTEROS JAIMES
LINA PAOLA PÁEZ SARMIENTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA UBICACIÓN DE PUNTOS DE
MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN
BAJO LOS PARÁMETROS DE LOS PLANES DE SEGURIDAD DEL AGUA**

**OMAR ANDRÉS BALLESTEROS JAIMES
LINA PAOLA PAEZ SARMIENTO**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS

Ingeniero Civil, M.Sc

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS**

ESCUELA DE INGENIERA CIVIL

BUCARAMANGA

2015

Este proyecto de grado se lo dedico a Dios por cada una de las bendiciones recibidas a lo largo de mi carrera, a mis padres Arnoldo e Ilma porque de su mano inicié mi aprendizaje, por apoyarme en todo momento, por sus consejos pero sobre todo por su amor... Ese que me ha dado la fuerza de seguir adelante.

A mi familia por ser el motor de mi vida, a mi hermano y en especial a mis tíos Isnardo y Nancy por su apoyo en la culminación de mis estudios, son para mí un ejemplo de perseverancia y constancia.

A la Tuna UIS porque de alguna manera forman parte de lo que ahora soy, más que llenar estos años de música llenaron mi vida de alegría.

Para finalizar quiero dedicar todo esto a mi compañero Omar Ballesteros brindarme por su respeto y amistad durante el proceso de nuestro trabajo para que hoy los sueños se apoderaran de nuestra realidad.

Por ustedes y para ustedes.

Lina Paola Páez

En primera instancia quiero agradecer a Dios por alcanzar este logro en mi vida, ya que ha sido fuente de inspiración y mi guía durante el transcurso de mi carrera.

A mis padres Esther Jaimes Mantilla y Hugo Ballesteros Rey quienes a pesar de las grandes dificultades me han brindado su apoyo incondicional y su cariño para poder alcanzar cada meta que me he propuesto, a mi hermana Carol Ballesteros por ser mi cómplice y aliada en cada etapa de mi vida.

A mis amigos y compañeros de carrera de quienes aprendí y disfruté en el transcurso de estos años de estudio, a Juan Carlos Rojas por ser un gran consejero y amigo el cual me ha acompañado durante estos 10 años de amistad, a Hilmavelis González por haber llegado a mi vida y brindarme tanto cariño y apoyo.

A Lina Paola Páez quien fue mi compañera de tesis, quien ha sido una excelente amiga y quien fue tan paciente y perseverante durante la elaboración de éste proyecto, a todos los que fueron testigos de éste trabajo muchas gracias.

Omar Andrés Ballesteros Jaimes

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS, Director del proyecto por la confianza y orientación brindada durante el desarrollo de éste proyecto.

Al Doctor RICARDO OVIEDO por brindarnos asesoría correspondiente al tema de los Planes de Seguridad del Agua.

Al ingeniero JHON BAEZ por las asesorías brindadas en el manejo del Software ArcGis.

A la Universidad Industrial de Santander por abrir sus puertas para nosotros y permitirnos alcanzar el sueño de ser Ingenieros de tan prestigiosa institución.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	17
1. JUSTIFICACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS PLANES DE SEGURIDAD DEL AGUA	19
2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	21
3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE CALIDAD EXISTENTES	23
4. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PROPORCIONADA	26
4.1 LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE CALIDAD DENTRO DEL DISTRITO DE MALPASO	26
4.2 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA.	27
4.3 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL CLORO Y PRESIÓN EN LA RED	30
4.4 EDAD DEL AGUA EN LAS TUBERÍAS	37
4.5 REPORTE DE DAÑOS Y TIPO DE MATERIAL EN LAS TUBERÍAS	38
5. METODOLOGÍA	44

6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
7.	CONCLUSIONES	53
	BIBIOGRAFÍA	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Localización del Distrito de Malpaso.	22
Figura 2. Punto de calidad del barrio San Luis.	24
Figura 3. Punto de calidad del barrio Provenza.	25
Figura 4. Fotografía del Punto de Calidad	25
Figura 5. Distrito de malpaso con nodos de calidad.	27
Figura 6. Mapa amenaza sísmica para el distrito de Malpaso.	28
Figura 7. Porcentajes de amenaza área por sísmica para el distrito de Malpaso.	29
Figura 8. Porcentajes de cloro residual para el distrito de Malpaso.	32
Figura 9. Mapa de cloro residual para el distrito de Malpaso.	33
Figura 10. Presiones para el distrito de Malpaso.	35
Figura 11. Porcentajes de presión para el distrito de Malpaso	36
Figura 12. Porcentaje de tiempos de retención para el distrito de Malpaso.	37

Figura 13.	Edad del Agua para el distrito de Malpaso.	38
Figura 14.	Reporte de Daños para el distrito de Malpaso años [2005-2014].	39
Figura 15.	Reporte estadístico de Daños para el distrito de Malpaso.	40
Figura 16.	Gráfico de nodos de calidad dentro del reporte de daños.	41
Figura 17.	Porcentaje de material presente en el distrito de Malpaso.	42
Figura 18.	Mapa mental de la metodología implementada (elaborado en Xmind 2013)	47
Figura 19.	Mapa Puntos de incumplimiento y monitoreo existente para el distrito de Malpaso.	50
Figura 20.	Porcentaje de Riesgo para el distrito de Malpaso.	51
Figura 21.	Gráfico comparativo de los nodos intolerables con las estaciones de monitoreo.	51

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Información correspondiente al punto de calidad en el barrio San Luis.	23
Tabla 2. Información correspondiente al punto de calidad en el barrio Provenza.	24
Tabla 3. Nivel de riesgo por amenaza sísmica.	30
Tabla 4. Tabla adaptada de modelos para evaluación del cloro residual en una red de distribución.	31
Tabla 5. Nivel de riesgo por cloro residual.	34
Tabla 6. Nivel de riesgo por presiones en la red.	36
Tabla 7. Rugosidad del material y porcentaje presente en la red.	42
Tabla 8. Nivel de riesgo según tipo de material	43
Tabla 9. Tabla de peligros asociados y evento peligroso.	44
Tabla 10. Tabla para definir el peso de los indicadores.	45
Tabla 11. Tabla para definir el peso de los criterios.	46

Tabla 12. Matriz de riesgo semicuantitativa adaptada al distrito de Malpaso-Bucaramanga.

49

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA UBICACIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN BAJO LOS PARÁMETROS DE LOS PLANES DE SEGURIDAD DEL AGUA*

AUTORES: OMAR ANDRÉS BALLESTEROS JAIMES
LINA PAOLA PÁEZ SARMIENTO**

PALABRAS CLAVE: Planes de Seguridad del Agua, Puntos de Monitoreo, matriz de riesgo semicuantitativa, Cloro Residual, Reporte de Daños, Amenaza Sísmica, Edad del Agua, Presión.

DESCRIPCION:

Este estudio evaluó mediante una matriz de riesgo semicuantitativa la calidad del agua para el distrito de malpaso localizado en la ciudad de Bucaramanga, como respuesta a la necesidad de realizar un monitoreo permanente sobre el agua de consumo de los usuarios en éste sector. Para el análisis de datos que fueron proporcionados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb) se realizó el tratamiento de información a los siguientes parámetros: presión, cloro residual, edad del agua, amenaza sísmica, daños y tipo de material, con el objetivo de identificar y evaluar los peligros existentes. En el desarrollo de la metodología se usó un modelo de simulación hidráulica para generar reportes sobre el comportamiento de los parámetros mencionados a lo largo de la red de distribución y con base a esto se identificó su cumplimiento con los límites establecidos por la normativa nacional. Cada nodo de incumplimiento se categorizó con la calificación máxima establecida a partir de la información correspondiente de las propiedades dentro del software ARCGIS. Para cada una de las zonas vulnerables se asignó un índice de calidad y un grado de importancia que permitió cuantificar los criterios mencionados y proponer una ubicación para los puntos de monitoreo en la red de malpaso a partir de los planes de seguridad del agua (PSA).

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Fernando Castañeda Galvis

ABSTRACT

TITLE: PROPOSED METHODOLOGY FOR LOCATION POINTS OF MONITORING WATER QUALITY IN A DISTRIBUTION NETWORK UNDER THE PARAMETERS OF WATER SAFETY PLANS*

AUTHORS: OMAR ANDRÉS BALLESTEROS JAIMES
LINA PAOLA PAEZ SARMIENTO**

KEY WORDS: Water Safety Plans, Points Monitoring, Residual Chlorine, Damage Report, Seismic Hazard, Age Water Pressure.

DESCRIPTION: This study assessed using a risk matrix semiquantitative water quality for the District of “Malpaso” in the city of Bucaramanga. In response to the necessity of solving a permanent monitoring about the consumption of water of the people from that place to do a research proposal based on the analysis of data that were provided by the “Acueducto Metropolitano de Bucaramanga” (amb). A processing of information was conducted to the following parameters: pressure, residual chlorine, water age, seismic hazard, damages and type of material so a risk matrix could be built from the identification and assessment of existing dangers. In the methodology development was used the hydraulic simulation to get report of the behavior of the parameters before mentioned along of this distribution of network based on it, it was identified its accomplish whit the limits established by the national regulation. Every breach node was categorized with the maximum calification established since the corresponding information of the properties in the software ARCGIS. Of quality index and a importance degree, was assigned for each of the vulnerable zones which allowed to quantify the previously mentioned criteria and propose a location for the monitoring points in the “Malpaso” network based on the water safety plans (WSP).

* Degree Work

** Faculty of Phisical-Mechanicals Engineering. School of Civil Engineering. Director : Luis Fernando Castañeda Galvis

INTRODUCCIÓN

La ausencia de la calidad en el agua genera un aumento notable en la morbilidad debido a enfermedades diarreicas; como respuesta a esta problemática se realizan a nivel internacional eventos que pretenden encontrar una solución y lográndose incorporar en la normatividad vigente de diferentes países.¹ . La implementación de los planes de seguridad del agua (PSA), se ha hecho evidente por la necesidad que existe de unificar estrategias de gestión del riesgo y de calidad en los sistemas de abastecimiento, abarcando desde la fuente hasta el usuario final. Por esta razón, un tema de gran importancia en la red de distribución es la identificación y evaluación de peligros que perjudiquen la calidad del agua, ya que ésta se deteriora durante su recorrido a través de la red.

El uso de modelos estáticos y dinámicos de simulación en conjunto con los modelos de calidad para el monitoreo ha sido uno de los temas de mayor auge en el campo de la hidráulica urbana durante los últimos años,² con el fin de analizar los sistemas de distribución de agua potable. Para poder llevar a cabo el desarrollo de cualquier modelo se debe proponer una metodología y en ella definir ciertos parámetros como: presión, cloro residual, edad del agua, amenaza sísmica, daños y tipo de material que contribuyan a la identificación de zonas vulnerables y a la priorización del riesgo. Por ende la implementación de un adecuado programa de monitoreo permite a la empresa prestadora de servicio orientar la toma de decisiones en la operación, mantenimiento, planeación, diseño y gestión.

¹ VIDAL, Andrea Pérez; LOZADA, Patricia Torres; VÉLEZ, Camilo Hernán Cruz. Planes de seguridad del agua. Fundamentos y perspectivas de implementación en Colombia. En: Ingeniería e Investigación, 2009, vol. 29, no 3, p. 79.

² VIDAL, Rosario; MARTÍNEZ, Fernando; AYZA, Manuel. Aplicaciones de los modelos de calidad en la simulación de las redes de distribución de agua potable. En: Ingeniería del agua, 1994, vol. 1, no 3, p.

Con base en lo publicado por el Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia ahora conocidos como Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio se establece una guía para los aspectos técnicos para la selección de puntos de concertación en la red, donde se destacan las zonas que presentan riesgo por algún evento natural o donde usualmente surjan quejas de los usuarios relacionadas con la calidad del agua, daños en las tuberías o bajas presión.³

La implementación de puntos de concertación en una red de distribución es clave para el éxito de la ejecución de los PSA en la etapa de control y verificación, por esta razón en base a los parámetros establecidos por la resolución 2115 de 2007 para el índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano (IRCA) se analiza la información proporcionada por el acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb) con la finalidad de poder filtrar e identificar los parámetros necesarios presentando así una propuesta que permita localizar zonas en donde se deberían ubicar estaciones de monitoreo.

³MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Guía que amplía aspectos técnicos para la selección del punto de muestreo para el control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano sobre la red de distribución: justificación. RESOLUCIÓN 0811. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2008. 3 p.

1. JUSTIFICACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS PLANES DE SEGURIDAD DEL AGUA

Hoy en día la implementación de los planes de seguridad del agua se ha convertido en una necesidad para el país ya que estos se orientan al suministro de agua de calidad teniendo en cuenta su proceso, es decir, desde la captación hasta el usuario final, cabe resaltar que los PSA surgen por la necesidad de unificar estrategias de gestión del riesgo y calidad de agua en los sistemas de abastecimientos (fuente, proceso de tratamiento y redes domiciliarias) los cuales pueden ser cuantificados a través de procesos de evaluación y control.⁴

El compromiso que debería de adquirir las empresas prestadoras de servicio, Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio se hace evidente por las nuevas tendencias que se han presentado a nivel mundial en el sector de agua potable y saneamiento implementando los PSA como una herramienta preventiva para garantizar la calidad del agua potable hasta el principal beneficiario.

El análisis de los peligros y puntos críticos de control (APPCC) es un acercamiento sistemático para lograr la identificación, evaluación y prevención de las eventualidades instalando un sistema de monitoreo⁵. Para tomar las medidas correctivas que sean necesarias se deben establecer procedimientos de verificación o validación registrándolos y documentándolos.

⁴ ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Guías para la calidad del agua potable. Primer Apéndice a la tercera Edición, Volumen 1. Recomendaciones. Gineve, Suiza: O.M.S. 2006. P. 46.

⁵ *Ibíd.* P. 46.

Muchos de los problemas que se evidencian en Colombia se relacionan con las deficiencias en la operación, mantenimiento, mal funcionamiento de las plantas de tratamientos, precariedad en las redes de distribución y continuidad del servicio⁶. Por ello, en la nueva normativa nacional se busca implementar la utilización de los mapas de riesgo y la evaluación de los índices de calidad.

En conclusión la falta de personal capacitado para la elaboración de los PSA y la dificultad en la identificación de los agentes que pueden conducir a una falsa seguridad en cumplimiento de los objetivos que se establezcan en este plan incentiva a la inversión en la implementación de sistemas de gestión de riesgo y eficacia, pues han demostrado ser una herramienta de gran utilidad porque permite el control de la calidad de agua producida y además facilita el desarrollo de la implementación de los planes de seguridad del agua.

⁶ Ibid. p 46.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para el desarrollo de la metodología a realizar se escogió el distrito de malpaso, distrito el cual ha sido trabajado en anteriores proyectos de grado ubicado en el municipio de Bucaramanga, zona perteneciente al Área Metropolitana de Bucaramanga, sector de suministro de agua por parte del amb S.A E.S.P. El distrito está conformado por barrios, asentamientos humanos y sectores de las comunas:

- ✚ La Pedregosa (comuna No.9): Conformado por Nueva granada, Antonia Santos Sur, Urbanización El Sol I y II, Quebrada la Iglesia, San Pedro Claver, San Martín, La Pedregosa, La Libertad, Diamante I, Las Casitas, Asturias, Torres de Alejandría, Aptos. El Sol, Bellavista y Villa Inés.

- ✚ Provenza (comuna No.10): Neptuno, Diamante II, San Luis, Urb. Provenza Fontana y el Cristal.

- ✚ Sur (comuna 11): Ciudad Venecia, El Rocío, Las Delicias, Manuela Beltrán I y II, Dangond, Toledo Plata, Granjas Julio Rincón, Jardines de Coaviconsá, El Porvenir, Santa María, Villa Alicia, Condado de Gibraltar y El Candado.

La zona de estudio se aprecia en la Figura 1.

Figura 1. Localización del Distrito de Malpaso.



Fuente. Imagen tomada de Google Earth para las comunas la Pedregoza, Provenza y Sur.

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE CALIDAD EXISTENTES

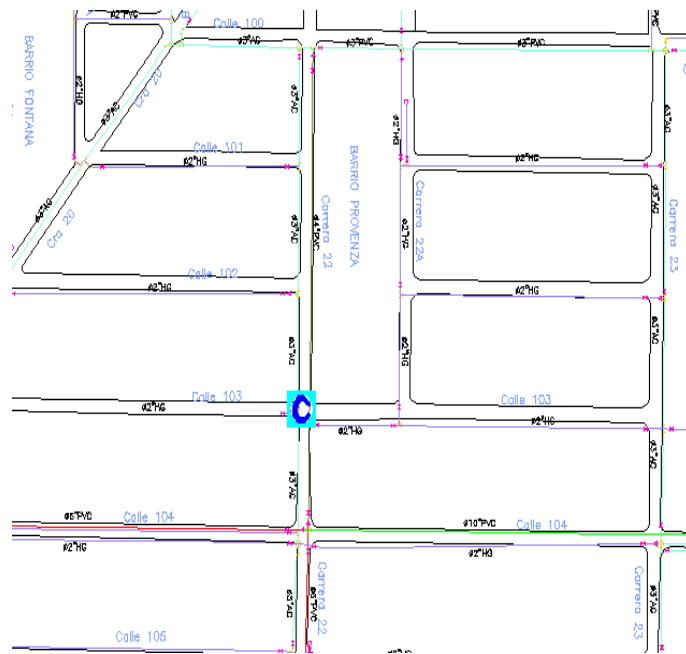
Luego de escogida la zona de estudio se procedió a identificar los puntos de monitoreo existentes en la red realizando visitas para identificación del sector; a continuación se pueden apreciar información e imágenes de algunos nodos de calidad del distrito:

Tabla 1. Información correspondiente al punto de calidad en el barrio San Luis.

Código del sitio:	Punto 020	
Barrio:	San Luis	
Dirección:	Calle 89 Carrera 20 Esquina	
Municipio:	Bucaramanga	
Código municipio:	68001	
Coordenadas	X: 106191.78	Y: 76101.7

Fuente. Acueducto metropolitano de Bucaramanga.

Figura 3. Punto de calidad del barrio Provenza.



Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 4. Fotografía del Punto de Calidad



Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

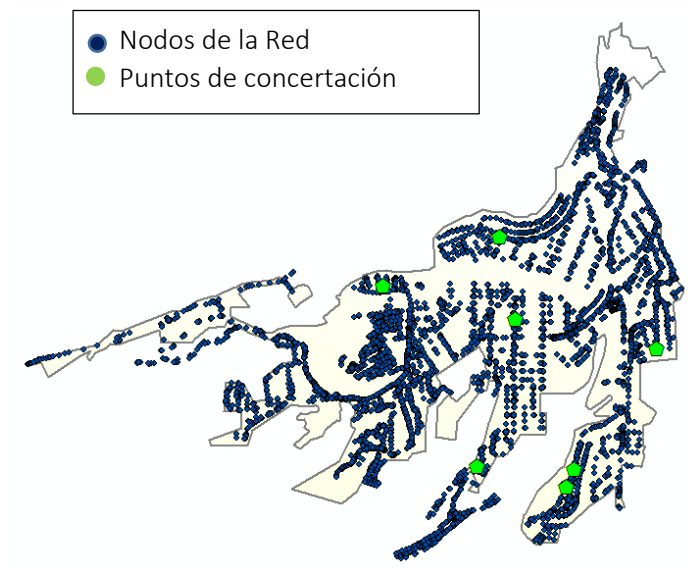
4. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PROPORCIONADA

Luego de realizadas las visitas se procede a realizar un tratamiento de la información proporcionada por el amb en donde se clasifica según el grado de importancia e influencia para la calidad de agua, esto con el fin de poder determinar los parámetros a tener en cuenta para la realización de las capas correspondientes para la identificación de las zonas críticas en donde se ubicarán los puntos de monitoreo para la red existente.

4.1 LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE CALIDAD DENTRO DEL DISTRITO DE MALPASO

Con la ayuda del software ARGIS usado en las instalaciones de la Universidad Industrial De Santander bajo licencia educacional, se procede a localizar los puntos de calidad dentro del distrito de Malpaso. En la Figura 5 se pueden apreciar la ubicación de los puntos que componen la red y las estaciones de monitoreo existentes.

Figura 5. Distrito de malpaso con nodos de calidad.



4.2 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA.

Los sistemas de distribución de agua potable son altamente vulnerables ante los deslizamientos que se pueden llegar a producir luego de un movimiento telúrico; es por esta razón que la amenaza sísmica se escogió como uno de los parámetros a tener en cuenta durante este estudio. Se presentan a continuación las dos acciones que generan mayor preocupación cuando se produce un evento de gran magnitud:

1. Deslizamientos de tierra que generan daños en las tuberías.
2. Deformaciones que disminuyen la resistencia de los materiales que componen la red.

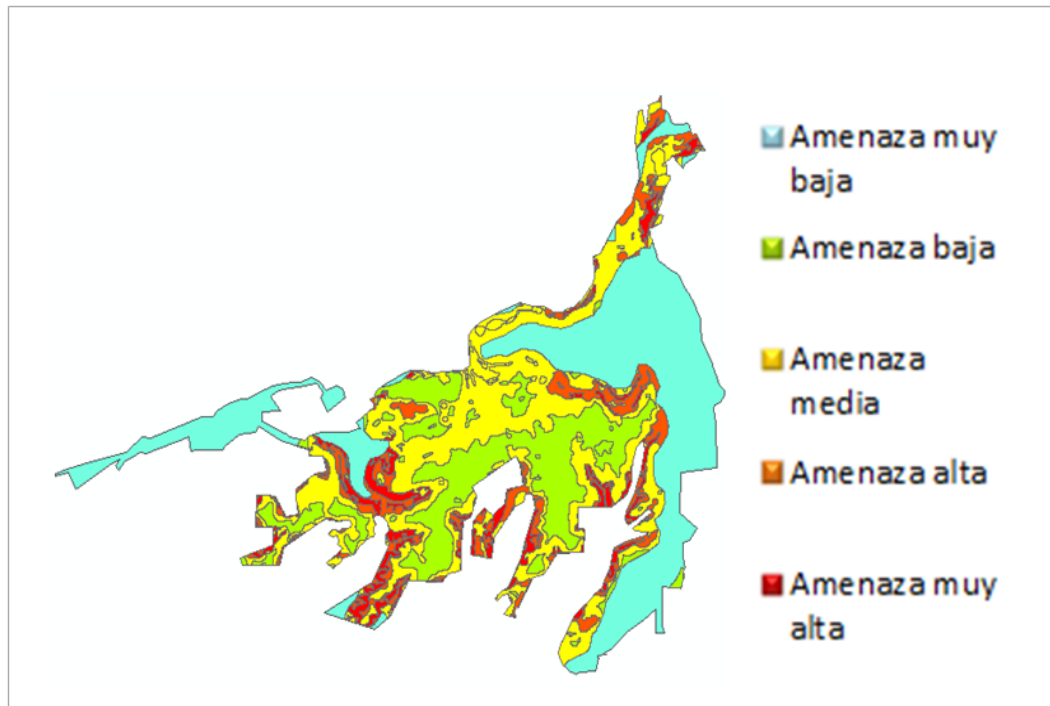
Luego de establecer la importancia de esta variable dentro del proceso de distribución de agua potable se realizó una zonificación sísmica con los datos

proporcionados por el amb con el fin de identificar las zonas críticas en la red del distrito de Malpaso. La representación gráfica de estos parámetros permitió la tipificación de las bases de datos a través de ARCGIS puesto que los mapas constituyen una forma muy efectiva de organizar, comprender y proporcionar grandes cantidades de información⁷.

El reglamento colombiano de construcción sismoresistente establece (tabla A.2.3-1) el nivel de amenaza sísmica según los valores de A_a y A_v (aceleración pico efectiva y velocidad pico efectiva respectivamente). En ella se clasifican como amenaza baja los valores entre [0.05- 0.10], amenaza intermedia entre [0.10-0.20] y amenaza alta entre [0.20-0.50], lo que ubica a la ciudad de Bucaramanga en la categoría de amenaza alta con un $A_a= 0.25$. Con base a la información proporcionada por el amb se presenta un gráfico donde se identifica la zona de riesgo sísmico en cinco categorías que van desde muy baja a muy alta:

⁷ ArcGIS RESOURCES. **Introducción a ArcGIS**. [en línea]. ArcGis. [New York: E.U.] ArcGIS RESOURCES,. [citado: 25 Junio 2015]. Disponible en Internet: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

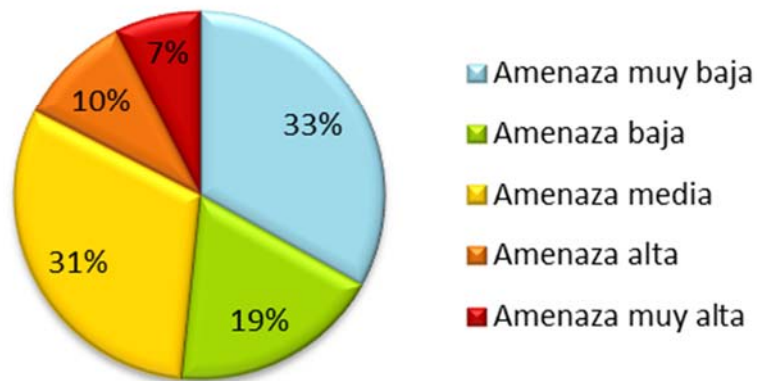
Figura 6. Mapa amenaza sísmica para el distrito de Malpaso.



Ahora bien, para identificar los componentes del sistema de amenaza sísmica se realizó una cuantificación en términos estadísticos que permitió establecer el porcentaje correspondiente a cada categoría en comparación con el área total del distrito.

Figura 7. Porcentajes de amenaza área por sísmica para el distrito de Malpaso.

Amenaza sísmica distrito Malpaso



De lo anterior se puede observar que aproximadamente la mitad del territorio correspondiente al distrito se encuentra bajo una amenaza representativa, por ello se hizo necesario realizar una estimación de la vulnerabilidad física y del riesgo en la red de distribución. Además, la asignación de un valor cuantitativo a cada escalafón de amenaza se generó con el fin de realizar un análisis multicriterio que permita establecer las zonas donde deberían estar ubicados los puntos de monitoreo para el distrito de Malpaso.

Tabla 3. Nivel de riesgo por amenaza sísmica.

Parámetro	Nivel de riesgo	Área m ²
Amenaza muy baja	1	1708666,71
Amenaza baja	2	954556,64
Amenaza media	3	1594483,77
Amenaza alta	4	517231,36
Amenaza muy alta	5	382155,47
Distrito malpaso		5157093,96

4.3 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL CLORO Y PRESIÓN EN LA RED

Actualmente existen diversas herramientas que permiten realizar la modelación hidráulica de parámetros, ayudando a comprender el comportamiento de la red y llevando a cabo cálculos mediante una simulación. Los tipos de cálculo se clasifican en: Estáticos y dinámicos, su uso respectivo depende de las variables que se encuentren implicadas dentro del patrón de calidad, por ejemplo: para sustancias NO conservativas como el cloro deben usarse modelos dinámicos y una constante cinética de decaimiento⁸. En base a la investigación realizada por el ingeniero Marcel Lanteri Pierezan en Brasil se referencia la siguiente tabla aplicable para evaluar el cloro residual en la red.

⁸ VIDAL, Rosario; MARTÍNEZ, Fernando; AYZA, Manuel. Aplicaciones de los modelos de calidad en la simulación de las redes de distribución de agua potable. En: Ingeniería del agua, 1994, vol. 1, no 3.

Tabla 4. Tabla adaptada de modelos para evaluación del cloro residual en una red de distribución.

Modelo	Ecuación integrada
Primer orden	$C = C_0 * \exp(-kt)$
Enésimo orden	$C = \left(kt(n-1) + \left(\frac{1}{C_0} \right)^{(n-1)} \right)^{\frac{1}{n-1}}$
Primer orden limitada	$C = C^\circ + (C + C^\circ)e^{-kt}$
Primer orden paralela	$C = C_0xe^{-k_1t} + C_0(1-x)e^{-k_2t}$

Fuente. PIEREZAN, Marcel Lanteri. Monitoramento contínuo do residual do cloro em sistemas de distribuição de água para abastecimento. 2009.

Ahora bien, cuando se clora el agua filtrada en una planta de potabilización el cloro se mezcla de manera instantánea dentro del tanque y en la tubería se comporta como un RMC (reactor de mezcla completa) por ello para una tasa de desaparición de cloro residual en contacto con el agua se satisface una reacción de primer orden⁹.

$$r = K * CE \quad (1)$$

La metodología usada para calcular el valor de la constante cinética del cloro se basó en la toma de muestras a la salida del tanque y a lo largo de la red en distintos intervalos, ajustando su comportamiento exponencial a la siguiente fórmula según los resultados obtenidos en un estudio realizado por Uriel Salomón Barragán Cardozo en su monografía: “Modelo experimental para evaluar el cloro residual en el agua de las redes de distribución del acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A ESP (amb)”.

⁹ BARRAGÁN, Uriel salomón; Modelo experimental para evaluar el cloro residual en el agua de las redes de distribución del acueducto metropolitano de bucaramanga s.a. Trabajo de Grado Especialización en química ambiental. Bucaramanga, Colombia.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. 2010. 22 p.

$$C_e = C_o * e^{-Kt} \quad (2)$$

De acuerdo con lo mencionado se estimó un valor promedio de -0.08 para la constante de reacción cinética del cloro en la ciudad de Bucaramanga y respectivamente fue ingresado en las propiedades de calidad. En conclusión, el uso de este parámetro dentro de la modelación permite reflejar la velocidad a la cual va disminuyendo la concentración de la sustancia química por causa de las reacciones que se generan al interactuar con el agua y el material de la tubería.

Los puntos que deben ser controlados para cloración son los siguientes:

- Zonas que históricamente hayan presentado deficiencias en su cloración.
- Zonas de mezcla de caudales procedentes de distintos puntos de producción.
- Cualquier otro punto específicamente designado por el modelo matemático.

En la figura 4 se presentan las zonas críticas en donde los parámetros mínimos de cloro que establece la resolución 2115 (entre 0.3 mg/l y 2 mg/l) no se están cumpliendo. La información obtenida se presenta de forma estadística con el fin de establecer el porcentaje de nodos perteneciente a la red que tienen valores aceptables de cloro para consumo humano.

Figura 8. Porcentajes de cloro residual para el distrito de Malpaso.

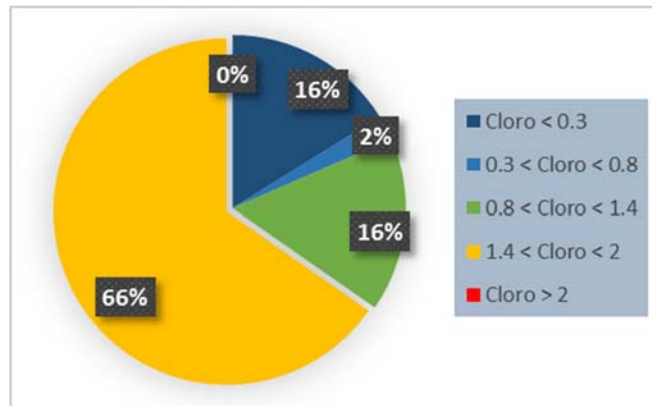
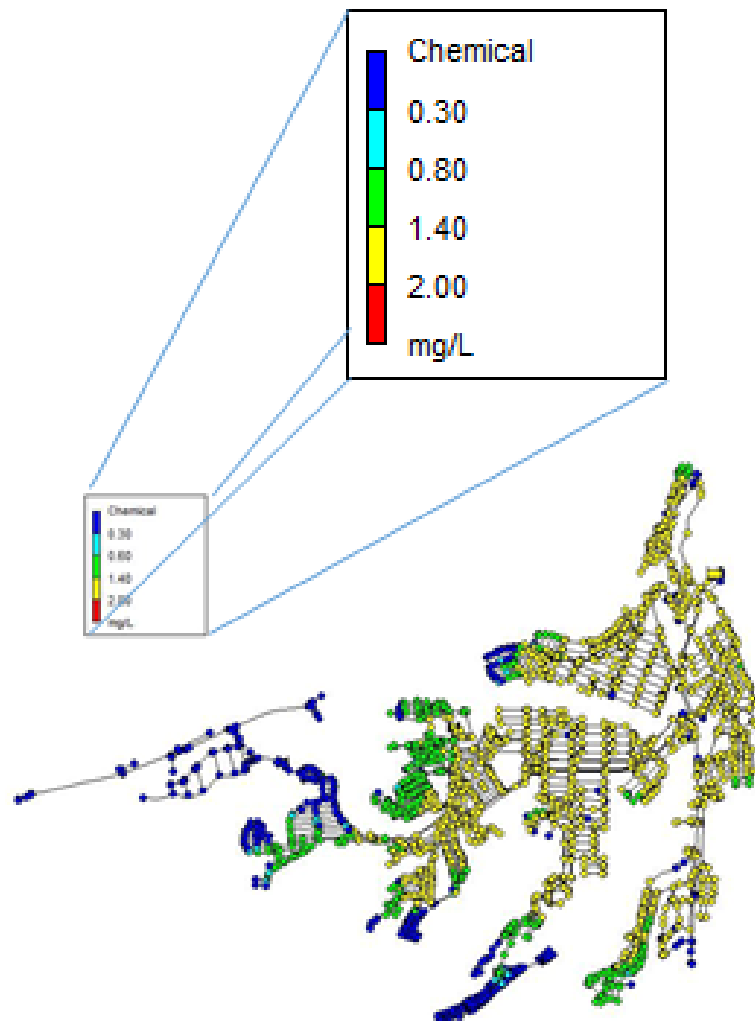


Figura 9. Mapa de cloro residual para el distrito de Malpaso.



En la siguiente Tabla 5 se asignó se presenta los intervalos de concentración de cloro residual.

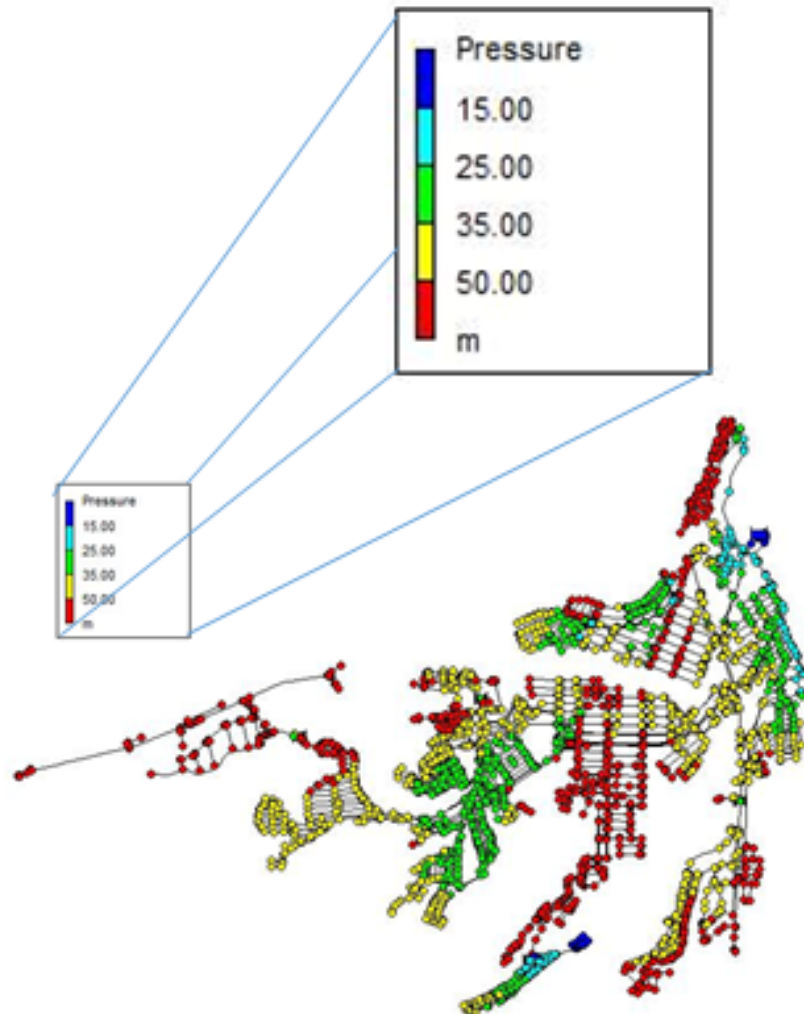
Tabla 5. Nivel de riesgo por cloro residual.

Riesgo	Cloro	puntos	Porcentaje
5	Cloro<0.3	778	16,16%
4	0.3<cloro<0.8	111	2,31%
3	0.8<cloro<1.4	780	16,21%
2	1.4<cloro<2	3144	65,32%
1	cloro>2	0	0,00%
Total		4813	100,00%

Para ello se generó un reporte con la información en cada nodo y tubería que compone la red compuesto por diagramas de evolución temporal. En esta investigación se usó Epanet 2.0 y en el fueron asignados los componentes físicos, constantes y parámetros de calidad inicial correspondientes al distrito de Malpaso en el municipio de Bucaramanga.

A continuación, se presenta un mapa de integridad física e hidráulica con el fin de identificar zonas de presión mínima y daños en el acueducto.

Figura 10. Presiones para el distrito de Malpaso.



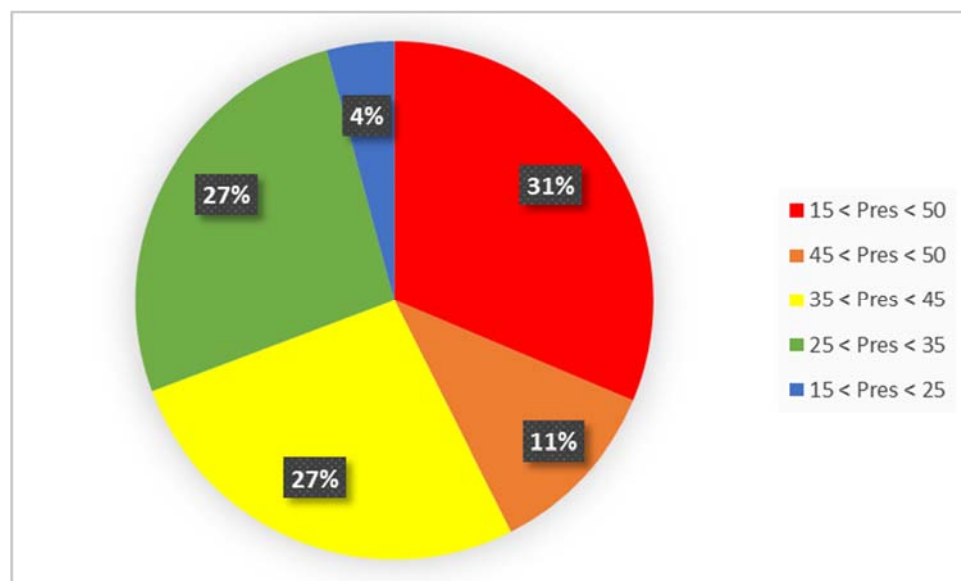
Si analizamos el envejecimiento de las tuberías y el inadecuado funcionamiento que afecta la calidad del agua podemos darnos cuenta que existen unas zonas críticas en donde la integridad hidráulica de la red se ve alterada. Factores como: los cambios bruscos de caudal, presión, inadecuado control operacional, cambios de diámetro y la formación de subproductos de desinfección son causales de vulnerabilidad dentro de la red.

La presión adecuada es uno de los parámetros con mayor relevancia dentro de esta investigación porque disminuye el riesgo de intrusión de contaminantes en la red causados por reflujos inversos o succión. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos con su respectiva estadística:

Tabla 6. Nivel de riesgo por presiones en la red. (Parámetros tomados del RAS 2000)

Riesgo	Presión (mca)	Cantidad puntos	porcentaje
5	15 > pres > 50	1509	31,35%
4	45 < pres < 50	540	11,22%
3	35 < pres < 45	1285	26,70%
2	25 < pres < 35	1276	26,51%
1	15 < pres < 25	203	4,22%
total		4813	100,00%

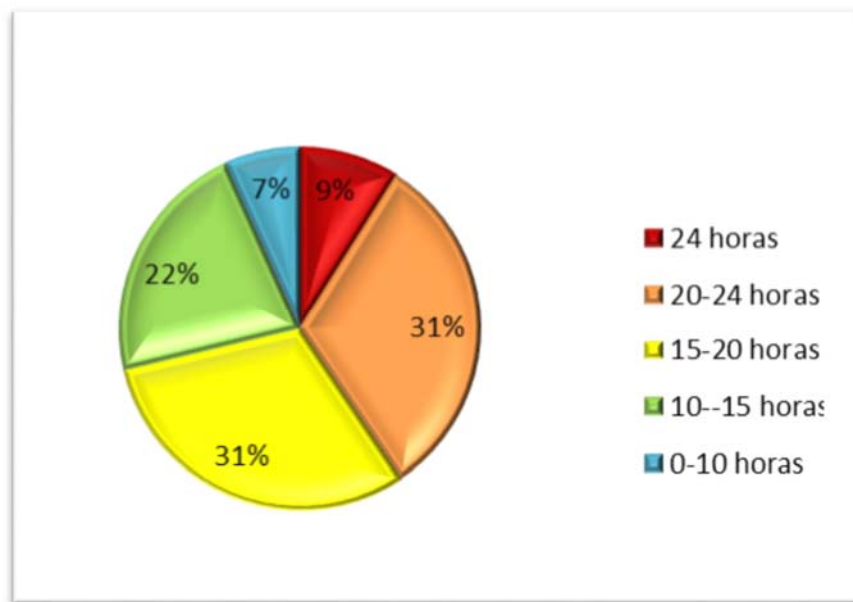
Figura 11. Porcentajes de presión para el distrito de Malpaso



4.4 EDAD DEL AGUA EN LAS TUBERÍAS

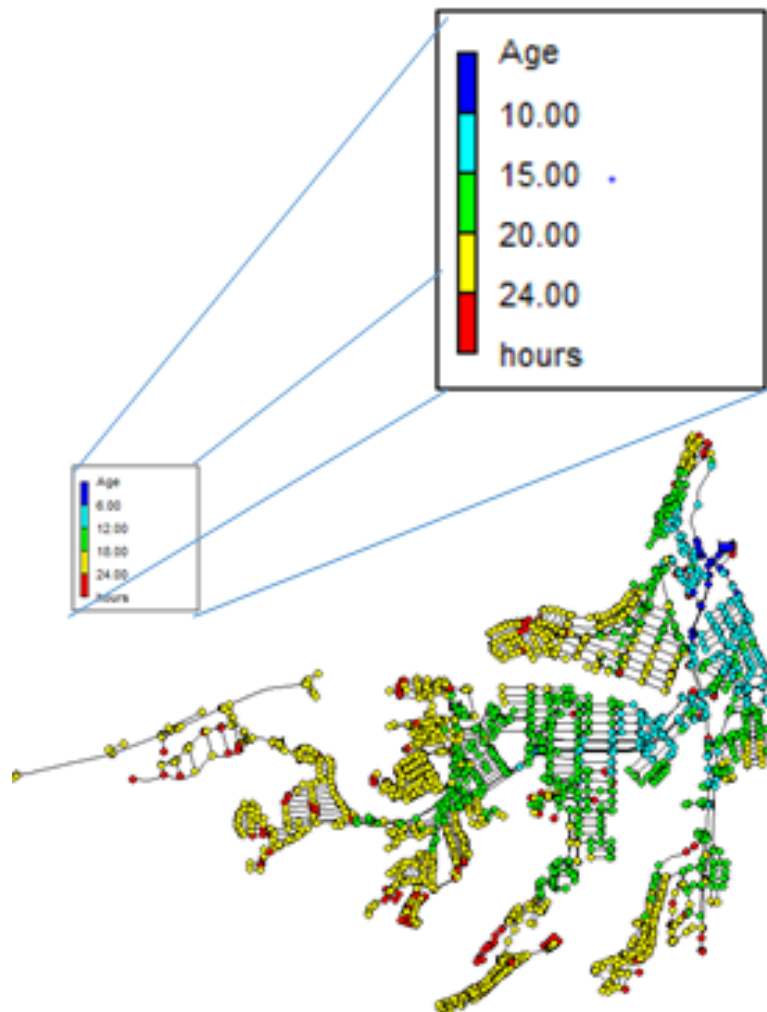
El tiempo que demora almacenado un volumen de agua dentro de las tuberías hace que aumente el riesgo a la contaminación y esto trae repercusiones en la calidad. Sin embargo, bajo condiciones constantes de demanda y alturas de los tanques de almacenamiento, se realizó la depuración del modelo hidráulico para generar el reporte de tiempos de retención en cada uno de los nodos y finalmente mediante un análisis de datos se determinó que el 9% de los puntos presentan edad del agua igual a 24 horas como se muestra en el siguiente gráfico:

Figura 12. Porcentaje de tiempos de retención para el distrito de Malpaso.



La estrecha relación que existe entre los tiempos de retención y el comportamiento de los niveles de cloro residual y la formación de depósitos hacen de este uno de los parámetros a tener en cuenta para el análisis en el distrito de malpaso. En la Figura 13 se puede apreciar los tiempos de retención en los nodos de la red.

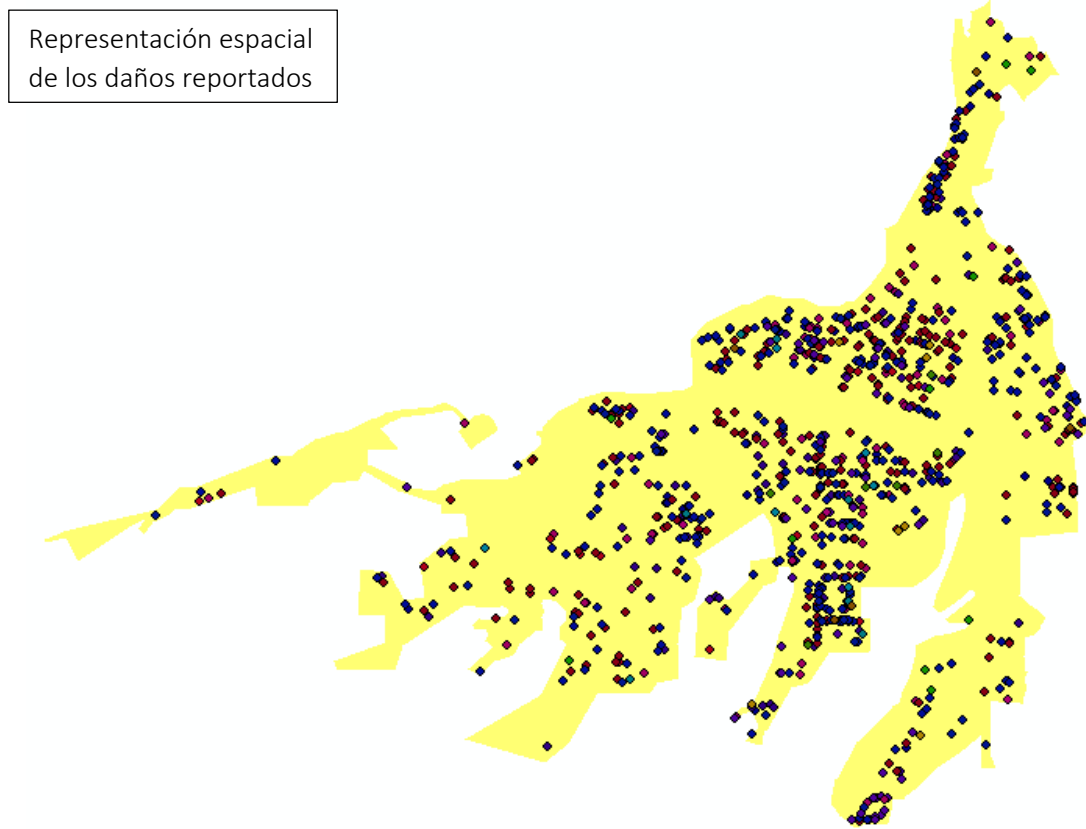
Figura 13. Edad del Agua para el distrito de Malpaso.



4.5 REPORTE DE DAÑOS Y TIPO DE MATERIAL EN LAS TUBERÍAS

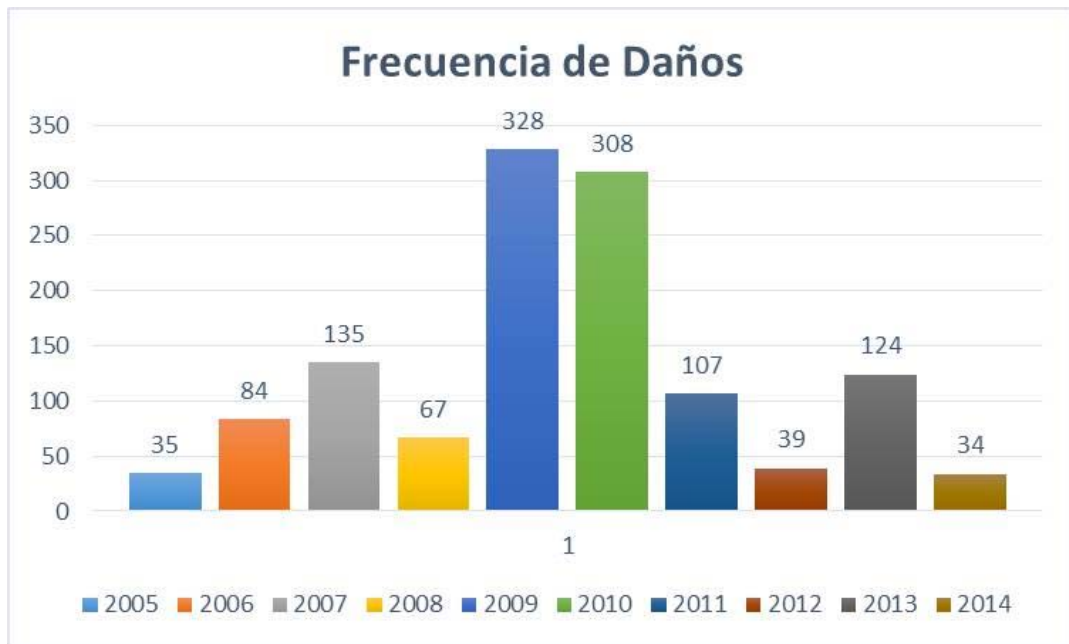
Una red de distribución es propensa a tener daños durante su funcionamiento, la identificación y el constante seguimiento a la red ayuda a tomar medidas preventivas las cuales mejoren la calidad de servicio a la comunidad; para el distrito de Malpaso se ubicaron los nodos que presentaban un reporte de daño teniendo en cuenta la información proporcionada por el acueducto.

Figura 14. Reporte de Daños para el distrito de Malpaso años [2005-2014].



De la información proporcionada se hizo un análisis estadístico del reporte de daños anual destacándose la frecuencia, el tipo de daño y la frecuencia del mismo, esta información se pueden apreciar en el siguientes gráficos.

Figura 15. Reporte estadístico de Daños para el distrito de Malpaso.

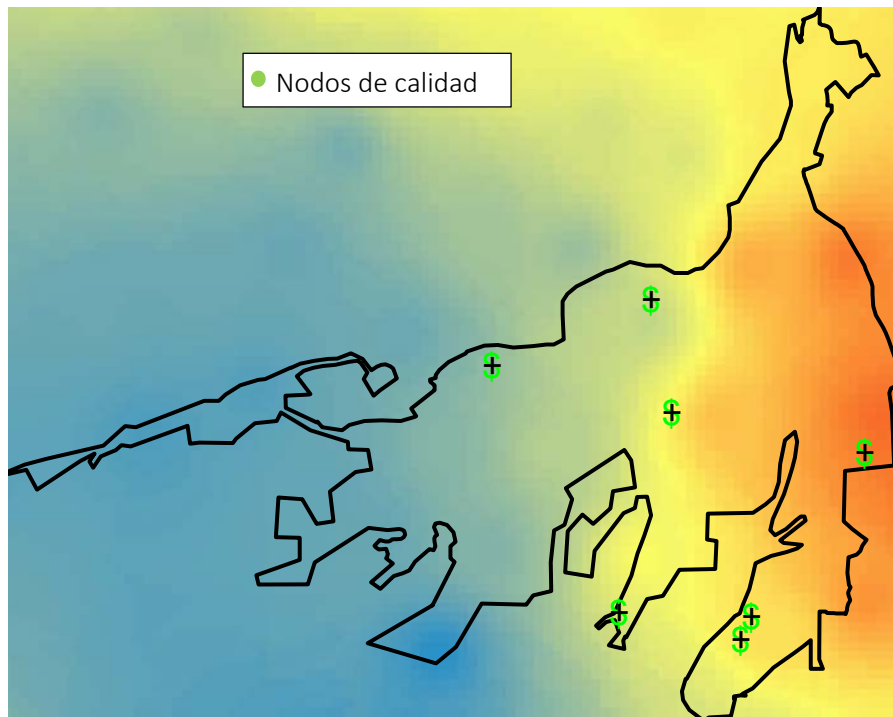


En el reporte se puede apreciar que en los años 2009 y 2010 se presentaron mayores daños en comparación de los demás años según lo proporcionado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. A pesar de que estos son bastante influyentes a la hora de ubicar las estaciones de monitoreo, no son tenidos en cuenta para la metodología a implementar puesto que se pudo evidenciar que los nodos de calidad se encuentran ubicados dentro de las zonas de mayor densidad de reporte de daños en la red, además por falta de información no se pudo relacionar de manera eficaz con los nodos de la red calibrada.

En la figura 16 se aprecia la ubicación de los puntos de calidad dentro del reporte de daños, dicho reporte se trabajó en el software ARCGIS generando zonas de calor a partir de una correlación positiva y negativa las cuclas se identifican por colores. La correlación de los daños presentada en éste esquema nos ayuda a evaluar la

influencia de los daños en donde el color rojo representa las áreas más significativas.

Figura 16. Gráfico de nodos de calidad dentro del reporte de daños.

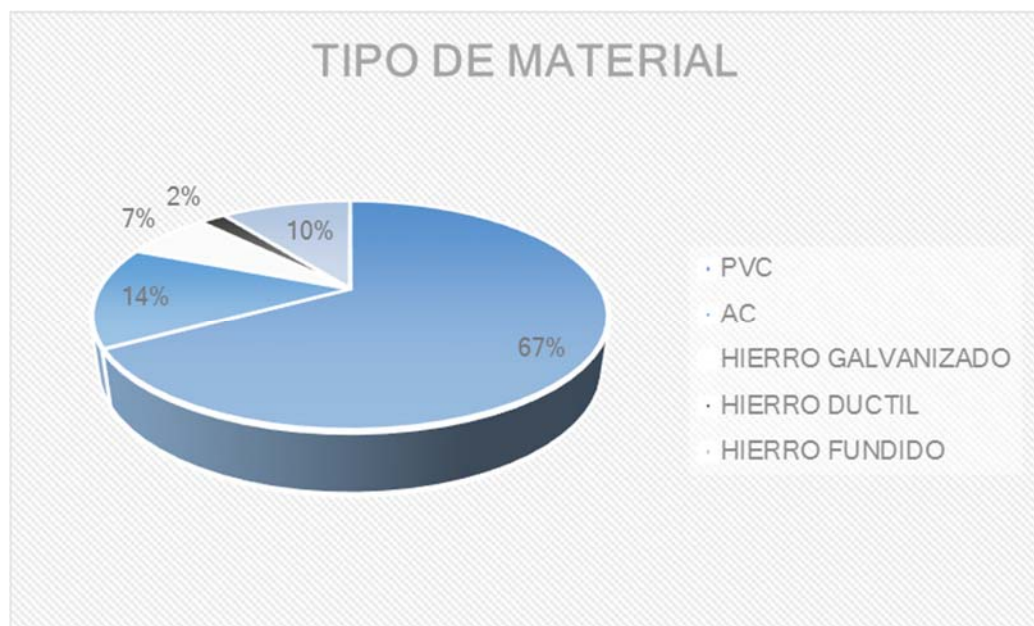


A pesar de que el agua salga en buenas condiciones de la planta de tratamiento ésta es propensa al deterioro durante su distribución, el decaimiento de la calidad se ve afectado por el aumento de la corrosión en los materiales influyendo en gran medida en la producción de biopelículas ayudan al aumento de las bacterias en la red, es por esto que el análisis de del material de la tubería es un factor importante a analizar para la calidad en el agua.¹⁰

¹⁰ VARGAS GAMARRA, Andrea; SALDARRIAGA, Juan Guillermo. Influencia de los materiales de las tuberías en el crecimiento de biopelículas. Universidad de los Andes revisión [Online], 2005 [citado 15 de julio de 2015], p. 3-5. Disponible en internet.

Las razones por el cual se debe tener en cuenta el material presente se debe a los efectos que tiene la corrosión de los materiales metálicos y de cemento, afectando en gran medida a la calidad del agua en la red¹¹. La Figura 17 presenta el porcentaje correspondiente al tipo de material presente en el distrito de Malpaso.

Figura 17. Porcentaje de material presente en el distrito de Malpaso.



Luego de analizar estadísticamente el material presente en la red se asigna dentro de los nodos cercanos el valor de rugosidad correspondiente a cada tubería y luego se asignó un valor de riesgo teniendo en cuenta el deterioro de la calidad del agua según el tipo de tubería, estos análisis se puede apreciar en las Tablas 7 y 8.

¹¹ BERGHULT, B ., et al. Pipe material selection in drinking wáter systems – A conference summary. En: Water Science & Technology: Water Supply, 2001, vol. 1, no 3, p.117-125.

Tabla 7. Rugosidad del material y porcentaje presente en la red.

TIPO DE TUBERÍA	RUGOSIDAD	PORCENTAJE
PVC	0.0015	67%
AC	0.03	14%
HIERRO GALVANIZADO	0.15	7%
HIERRO DUCTIL	0.25	2%
HIERRO FUNDIDO	0.26	10%

Tabla 8. Nivel de riesgo según tipo de material

Riesgo	Material (mm)	Porcentaje
5	0.03	14%
4	0.26	10%
3	0.25	2%
2	0.15	7%
1	0.0015	67%
total		100,00%

5. METODOLOGÍA

La identificación y priorización de peligros para el análisis del riesgo en la red de Malpaso se integró a los principios de los planes de seguridad del agua y los datos proporcionados por el AMB. El objetivo principal es destacar en la integridad física e hidráulica del modelo los factores que tienen mayor influencia.

Los instrumentos para la identificación de peligros combinan información cuantitativa y cualitativa para poder generar una retroalimentación entre los eventos y los puntos de control existentes. El proceso se dividió en tres etapas: La primera de ellas abarca la identificación de eventos peligrosos y peligros asociados como se observa en la tabla 9, sin embargo para establecer la significancia de cada uno de ellos se debe hacer una evaluación que muestre la importancia que poseen en comparación con los demás.

Tabla 9. Tabla de peligros asociados y evento peligroso.

Peligro asociado	Evento Peligroso
Redes de acueducto antiguas	Deterioro de la calidad
Fugas y pérdidas de agua	Entrada de contaminación
Fluctuaciones presión	Entrada de contaminación
Elevada edad del agua	Deterioro de la calidad
Baja frecuencia de medición de sustancias	Deterioro de la calidad
Fallas geológicas (sismos, licuación y movimientos de tierra)	Entrada de contaminación / colapso del sistema

La segunda etapa consiste en asignar una puntuación que refleje los rangos de vulnerabilidad para el sistema teniendo en cuenta los análisis estadísticos de la información que se presentaron previamente y la posibilidad de representar de manera espacial los resultados obtenidos, los rangos presentados se basaron en la matriz semicuantitativa del Manual de PSA publicado por la OMS (Tabla 10).

Tabla 10. Tabla para definir el peso de los indicadores.

Rango de vulnerabilidad	Peso del indicador
Muy alto	25
Alto	20
Medio	15
Bajo	10
Muy Bajo	5

En la última etapa el tratamiento de la información juega un papel indispensable puesto que la metodología busca identificar los puntos de incumplimiento en la red de distribución, esta metodología se aprecia en la Figura 18. A continuación se exponen las fases que componen el proceso mencionado con el fin de generar una propuesta para ubicación de nuevas estaciones de monitoreo o en su defecto reubicación de las existentes.

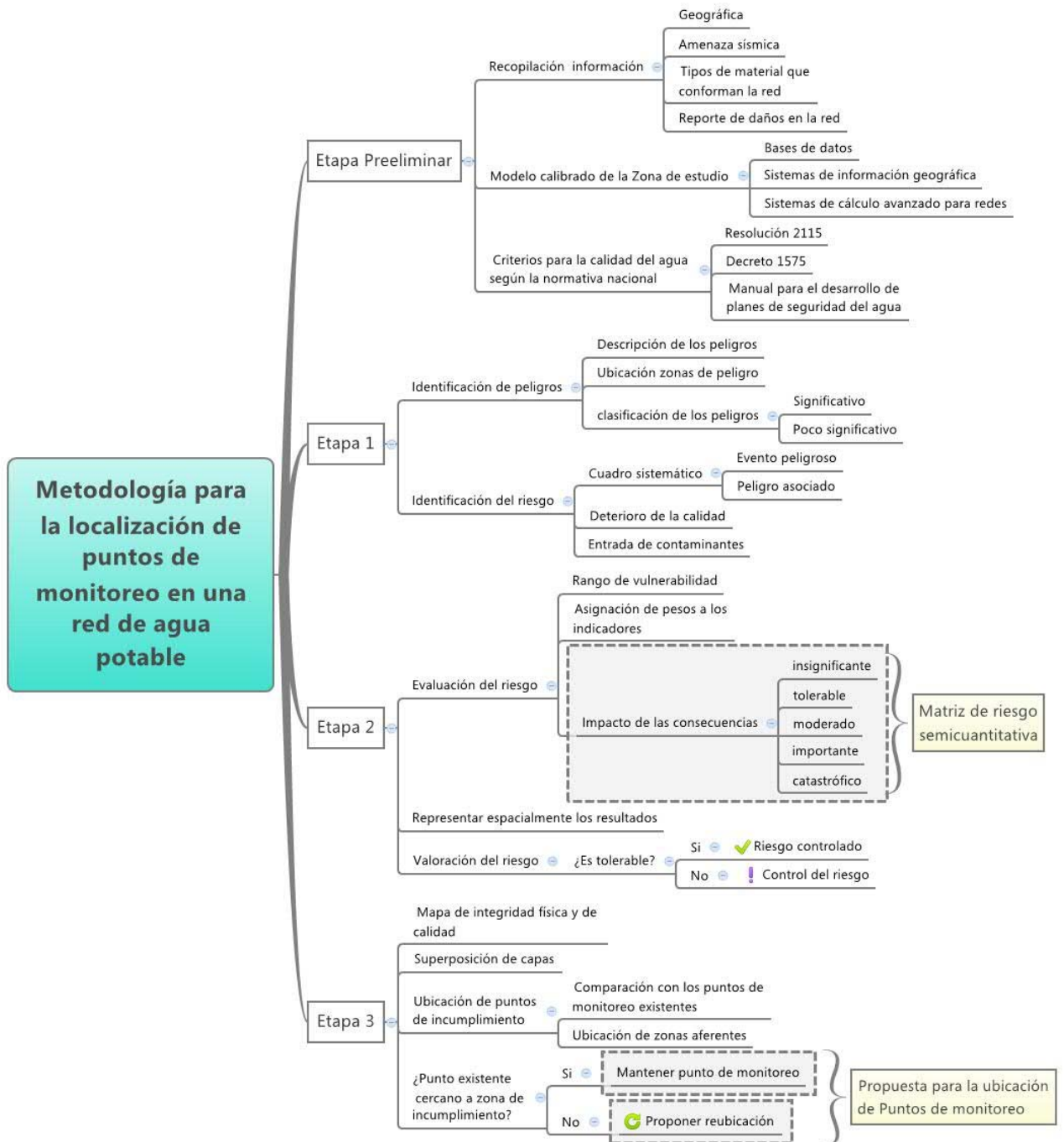
1. Recopilar la información suministrada por el amb perteneciente al distrito de Malpaso.
2. Ordenar los datos con el mismo identificador en los programas (Epanet, Arcgis y Excel).
3. Clasificar y asignar peso a los criterios.
4. Asignar propiedades en las tablas de atributos pertinentes.
5. Utilizar la información para obtener los puntos de incumplimiento en la red de distribución.

En la Tabla 11 se exponen los pesos que tendrá cada criterio según la categoría a la que pertenecen, cada peso fue asignado luego de consultar a diferentes ingenieros que laboran en el amb quienes a partir de su experiencia y criterio dieron valores de peso a cada criterio analizado analizando cuales eran más influyentes en la calidad del agua.

Tabla 11. Tabla para definir el peso de los criterios.

Criterio	Peso del criterio
Cloro residual	25%
Amenaza sísmica	15%
Velocidad	10%
Presión mínima	15%
Material	10%
Edad del agua	25%

Figura 18. Mapa mental de la metodología implementada (elaborado en Xmind 2013)



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La importancia de los SIG radica en su utilidad para la toma de decisiones técnicas, administrativas y económicas ya que, en general, la solución a muchos problemas requiere acceder a diversa información que sólo puede ser relacionada con la geografía¹². Luego ordenar todos los datos se realizó un análisis multicriterio a través de una matriz semicuantitativa, donde se evaluó la contribución a la seguridad del agua que aporta cada uno de ellos (tabla 10).

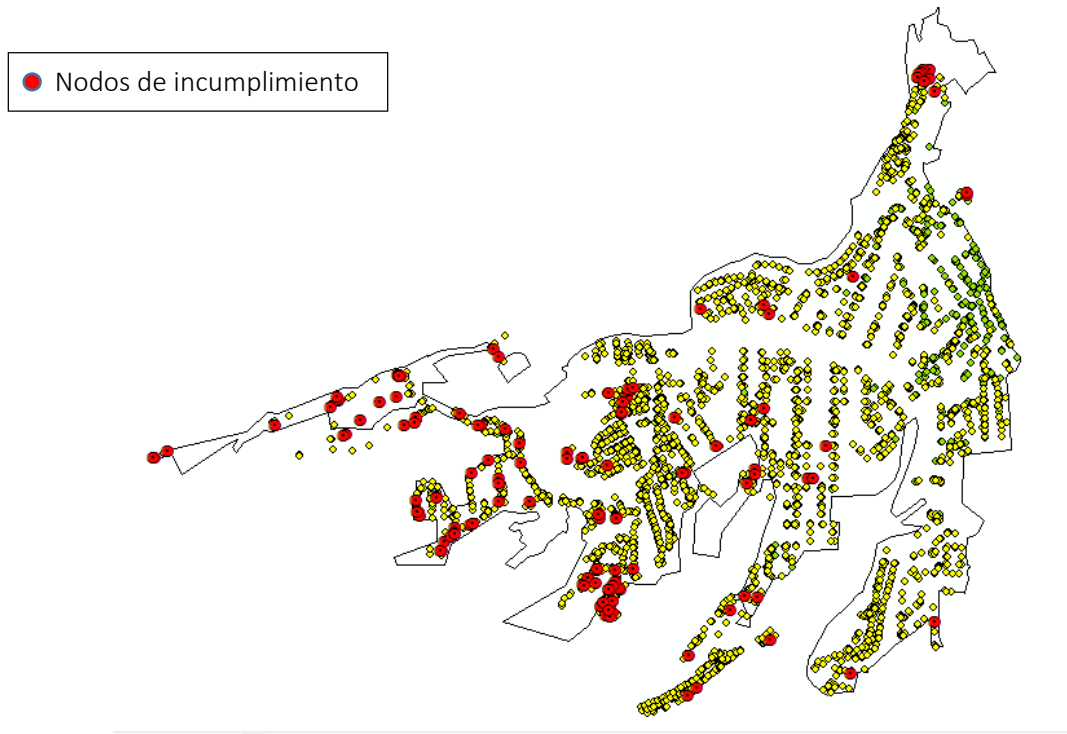
Además, se creó un mapa de integridad para la calidad con los criterios establecidos a lo largo del proyecto donde se identifican los puntos de monitoreo existentes en relación con los puntos de incumplimiento

¹² MONTOYA, Carolina, et al. Propuesta metodológica para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua en redes de distribución utilizando sistemas de información geográfica. En: Revista Facultad de Ingeniería, 2013, no 49, p. 129-140.

Tabla 12. Matriz de riesgo semicuantitativa adaptada al distrito de Malpaso-Bucaramanga.

Matriz de riesgo semicuantitativa	Impacto/ gravedad de las consecuencias				
	<u>insignificante</u>	<u>tolerable</u>	<u>moderado</u>	<u>importante</u>	<u>catastrófico</u>
<p>Probabilidad de ocurrencia</p> <p><u>Casi certeza:</u> Ha ocurrido en varias oportunidades y existe certeza de que puede volver a ocurrir.</p> <p><u>Probable:</u> Ha ocurrido en algunas oportunidades.Frecuencia: Una o varias veces al año.</p> <p><u>Moderado:</u> Ha ocurrido algunas vez:Almenos 1 vez en 5 años</p> <p><u>Improbable:</u> Es posible y no puede descartarse totalmente.</p> <p><u>Raro:</u> No ha ocurrido pero puede presentarse.</p>	Agua segura en el SDA. Apta para consumo en cumplimiento con las normas.	Apta para consumos. Sin consecuencias reelevantes por incumplimiento de algunos parámetros	Incumplimiento de algunas características con posibles consecuencias a largo plazo para la salud.	Posible contaminación microbiológica del agua. Repercusión en la salud de la población a mediano plazo.	Compromete la seguridad del agua o interrupción del abastecimiento. Requiere acción urgente.Puede causar enfermedades ala
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

Figura 19. Mapa Puntos de incumplimiento y monitoreo existente para el distrito de Malpaso.



Con los resultados obtenidos luego del análisis se determinó que el 0.23% de la red se encuentra en riesgo bajo, 17.37% en nivel de riesgo moderado, 79.60% riesgo importante y el 2.80% se clasificó como intolerable porque tiene una alta probabilidad de comprometer la seguridad del agua o la continuidad del abastecimiento. Los PSA establecen que si el monitoreo detecta que un parámetro de un proceso está fuera de los límites críticos u operativos especificados, es preciso tomar medidas para corregir la desviación y restaurar el funcionamiento normal de la operación¹³.

¹³ BARTRAM J, et al. Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua: Metodología Pormenorizado De Gestion De Riesgos Para Proveedores De Agua De Consumo. Ginebra.: Organización Mundial de la Salud, 2009. 10-25 p.

El distrito de Malpaso tiene una totalidad de 28114 usuarios para los cuales según los porcentajes obtenidos de riesgo de la metodología implementada se determina que: 65 habitantes se encuentran en riesgo bajo, 4883 en riesgo moderado, 22379 en riesgo importante y 787 se encuentran en un riesgo intolerable siendo éstos los más afectados.

Al superponer la capa de nodos intolerables con los puntos de monitoreo existentes se puede apreciar que solo una de dichas estaciones se encuentra ubicada de manera adecuada dentro de la red del distrito de Malpaso, tres estaciones se encuentran cercanas a nodos de incumplimiento y las demás no tienen una ubicación adecuada y se encuentran alejadas de los nodos intolerables (Figura 20).

Figura 20. Porcentaje de Riesgo para el distrito de Malpaso.

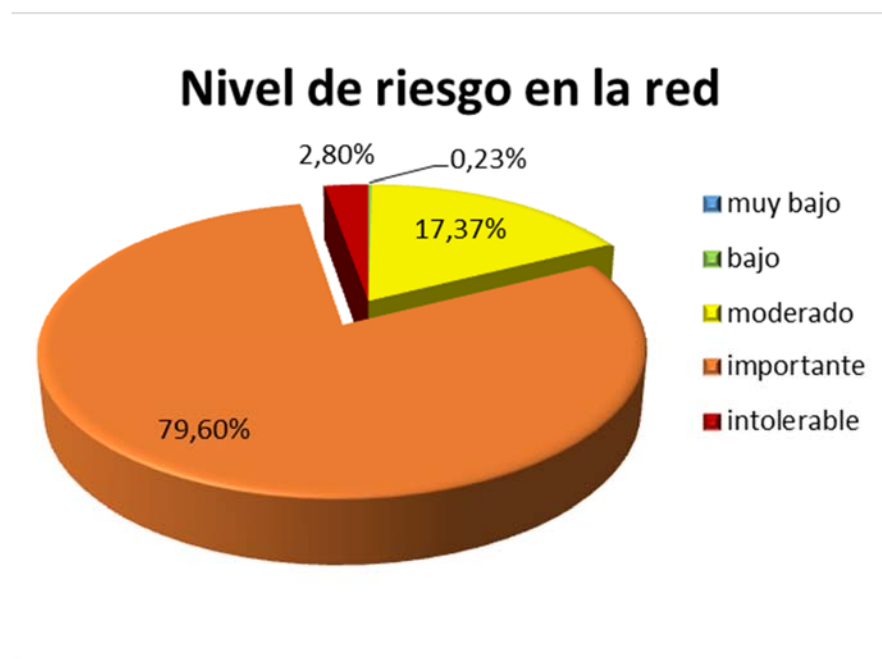
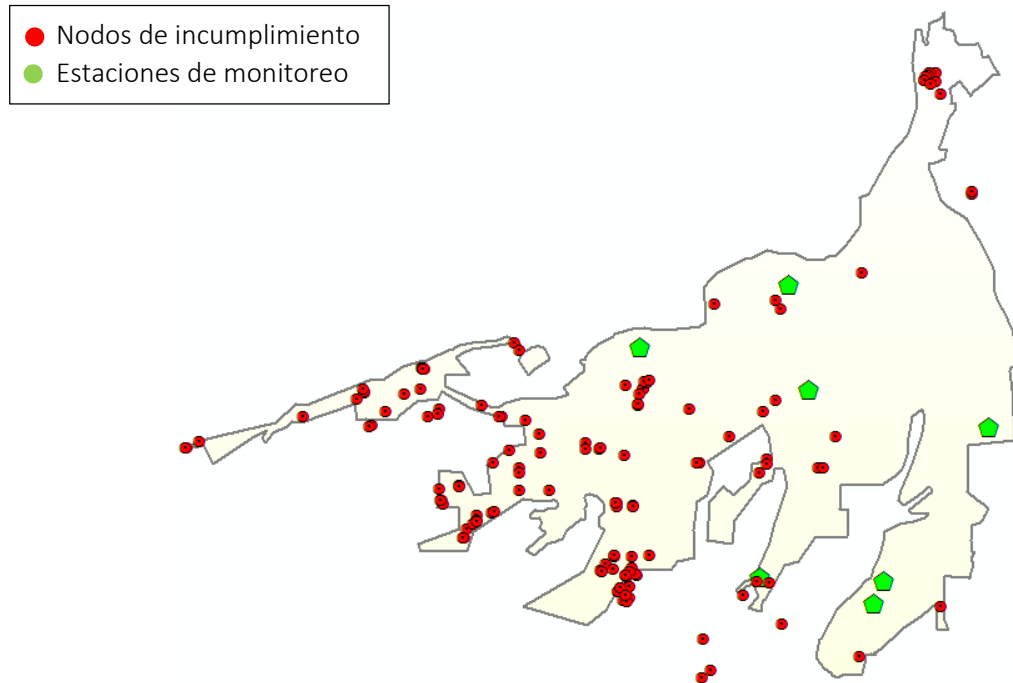


Figura 21. Gráfico comparativo de los nodos intolerables con las estaciones de monitoreo.



Se puede decir que la metodología efectuada en conjunto a la implementación de los planes de seguridad del agua aporta resultados óptimos al momento de establecer zonas críticas de incumplimiento. Al realizar una comparación de las estaciones de monitoreo existentes con los nodos de incumplimiento se sugiere la reubicación de los puntos de concertación lejanos, ya que la información que brindan no da un soporte para determinar si el agua que está pasando por dicho sector cumple con lo establecido por las normativas existentes en cuanto a los parámetros establecidos en la metodología efectuada.

7. CONCLUSIONES

Se estableció una metodología para ubicar puntos de concertación a través de un análisis multicriterio con una matriz de riesgo semicuantitativa, destacándose en el proceso las siguientes tres etapas:

1. Identificación de peligros y eventos peligrosos
2. Evaluación del riesgo
3. Ubicación espacial de los puntos de incumplimiento.

A través de una superposición de capas y tratamiento de la información geográfica, se integraron los parámetros físicos (presión, velocidad, tiempo de retención, material de la tubería), químicos (cloro residual) y geográficos (Amenaza sísmica) en un mapa de integridad para la calidad. A cada uno de estos se le asignó un peso con el fin de dar relevancia a los parámetros más influyentes y de esta manera hacer una detección temprana de algunas repercusiones en la calidad del agua.

Se estableció un modelo dinámico para la simulación hidráulica del cloro residual en el software Epanet 2.0, utilizando una ecuación de primer orden para describir el comportamiento del cloro como sustancia no conservativa dentro de la red de malpaso. La constante de decaimiento asignada fue -0.08 basados en el estudio del ingeniero Uriel salomón Barragán, donde se establece este valor promedio para la ciudad de Bucaramanga.

Se creó una matriz de riesgo semicuantitativa donde se evaluó la gravedad de las consecuencias que podrían llegar a comprometer la seguridad del agua o la interrupción del abastecimiento. Luego de realizar el tratamiento de la información se identificó que el 0.23% de la red se encuentra en un nivel de riesgo bajo, 17.37% riesgo moderado, 79.60% riesgo importante y el 2.80% se clasificó como intolerable.

Se generó un mapa con la ayuda de ARGIS, software implementado para la visualización y análisis de información de diferentes áreas de estudio (bajo licencia educacional), para la zonificación del riesgo en la red. Luego de clasificar los nodos, se seleccionaron los puntos intolerables y la localización de estos fue comparada finalmente con la de los 7 puntos de monitoreo existentes en el distrito de malpaso.

En conclusión se deben conservar los puntos de monitoreo existentes porque están generando un reporte significativo del estado y dinámica del agua según los resultados obtenidos, sin embargo se propone la ubicación de nuevas estaciones de monitoreo para abarcar zonas que se clasificaron bajo la metodología establecida como puntos de incumplimiento. Además, con la ubicación de nuevos puntos de concertación se busca que puedan ser detectados tempranamente repercusiones en la calidad del agua de consumo.

Por último se evidencia la necesidad de crear con mayor frecuencia estrategias para implementar los PSA en Colombia, garantizando no solo la seguridad y sostenibilidad de los servicios de agua para la población sino también obteniendo beneficios adicionales para las empresas prestadoras del servicio¹⁴.

¹⁴ VIDAL, Andrea Pérez; LOZADA, Patricia Torres; VÉLEZ, Camilo Hernán Cruz. Planes de seguridad del agua. Fundamentos y perspectivas de implementación en Colombia. En: Ingeniería e Investigación, 2009, vol. 29, no 3, p. 83.

BIBLIOGRAFÍA

ArcGIS RESOURCES. Introducción a ArcGIS. [en línea]. ArcGis. [New York: E.U.] ArcGIS RESOURCES,. [citado: 25 Junio 2015]. Disponible en Internet: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

BARRAGÁN, Uriel salomón; Modelo experimental para evaluar el cloro residual en el agua de las redes de distribución del acueducto metropolitano de bucaramanga s.a. Trabajo de Grado Especialización en química ambiental. Bucaramanga, Colombia.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. 2010. 22 p.

BARTRAM J, et al. Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua: Metodología Pormenorizado De Gestion De Riesgos Para Proveedores De Agua De Consumo. Ginebra.: Organización Mundial de la Salud, 2009. 10-25 p.

BERGHULT, B., et al. Pipe material selection in drinking wáter systems – A conference summary. En: Water Science & Technology: Water Supply, 2001, vol. 1, no 3, p.117-125.

BIEUPOUDE, P.; AZOUMAH, Y.; NEVEU, P. Optimization of drinking water distribution networks: Computer-based methods and constructal design. Computers, En: Environment and Urban Systems, 2012, vol. 36, no 5, p. 434-444.

BLOKKER, M.; VREEBURG, J.; SPEIGHT, V. Residual chlorine in the extremities of the drinking water distribution system: the influence of stochastic water demands. En: Procedia Engineering, 2014, vol. 70, p. 172-180.

CORDOBA, GA Cuesta; TUHOVČÁK, L.; TAUŠ, M. Using artificial neural network models to assess water quality in water distribution networks. En: Procedia Engineering, 2014, vol. 70, p. 399-408.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Reglamento Técnico del Sector. Potable y Saneamiento Básico Ras–2000: Título B, Sistemas de Acueducto, RAS 2000. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2000, p.

HERNÁNDEZ ALMANZA, Henry José, et al; Calibración de cloro residual en sistemas de distribución de agua potable. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil. Medellín, Colombia.: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil. 2004. 24 p.

KIM, H.; KIM, S.; KOO, J. Prediction of chlorine concentration in various hydraulic conditions for a pilot scale water distribution system. En: Procedia Engineering, 2014, vol. 70, p. 934-942.

LLANO-RESTREPO, Mario A. Redacción y publicación de artículos científicos. En: Revista Ingeniería y Competitividad, 2011, vol. 8, no 2, p. 112-127.

LUO, Bijun, et al. Partial least squares regression model to predict water quality in urban water distribution systems. En: Transactions of Tianjin University, 2009, vol. 15, p. 140-144.

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Guía que amplía aspectos técnicos para la selección del punto de muestreo para el control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano sobre la red de distribución: justificación. RESOLUCIÓN 0811. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2008. 3 p.

MONTOYA, Carolina, et al. Propuesta metodológica para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua en redes de distribución utilizando sistemas de información geográfica. En: Revista Facultad de Ingeniería, 2013, no 49, p. 129-140.

MONTEIRO, L., et al. Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX. En: Procedia Engineering, 2014, vol. 70, p. 1192-1200.

OLIKER, N.; OSTFELD, A. Comparison of multivariate classification methods for contamination event detection in water distribution systems. En: Procedia Engineering, 2014, vol. 70, p. 1271-1279.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Guías para la calidad del agua potable. Primer Apéndice a la tercera Edición, Volumen 1. Recomendaciones. Gêneve, Suiza: O.M.S. 2006. P. 46.

PARDO ACOSTA, Fabio; SALDARRIAGA, Juan Guillermo. Optimización del cloro residual en la red de acueducto de Bogotá. Universidad de los Andes revisión [Online], 2005. [citado 15 de julio de 2015]. Disponible en internet.

PÉREZ-VIDAL, Andrea; AMÉZQUITA-MARROQUÍN, Claudia; TORRES-LOZADA, Patricia. Water Safety Plans: Risk assessment for consumers in Drinking Water Supply Systems. En: Revista Ingeniería y Competitividad, 2013, vol. 15, no 2.

SÁNCHEZ, Luís D., et al. Modelación del cloro residual y subproductos de la desinfección en un sector piloto del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Cali. En: Revista Ingeniería y Competitividad, 2011, vol. 12, no 1, p. 127-138.

VARGAS GAMARRA, Andrea; SALDARRIAGA, Juan Guillermo. Influencia de los materiales de las tuberías en el crecimiento de biopelículas. Universidad de los Andes revisión [Online], 2005 [citado 35 de julio de 2015], p. 3-5. Disponible en internet.

VIDAL, Andrea Pérez; LOZADA, Patricia Torres; VÉLEZ, Camilo Hernán Cruz. Planes de seguridad del agua. Fundamentos y perspectivas de implementación en Colombia. En: Ingeniería e Investigación, 2009, vol. 29, no 3, p. 79.

VIDAL, Rosario; MARTÍNEZ, Fernando; AYZA, Manuel. Aplicaciones de los modelos de calidad en la simulación de las redes de distribución de agua potable. En: Ingeniería del agua, 1994, vol. 1, no 3, p.