

## **Propuesta metodológica para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua en redes de distribución utilizando sistemas de información geográfica**

### **Methodological proposal for locating water quality monitoring stations in distribution networks using geographic information systems**

*Carolina Montoya<sup>1\*</sup>, Diana Loaiza<sup>1</sup>, Camilo Cruz<sup>1</sup>, Patricia Torres<sup>1</sup>, Juan Carlos Escobar<sup>2</sup>, Luís Germán Delgado<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Apartado Aéreo 25360, Cali, Colombia

<sup>2</sup> Departamento de Producción de Agua Potable -EMCALI EICE ESP, Apartado Aéreo 25360, Cali, Colombia

(Recibido el 8 de julio de 2008. Aceptado el 26 de mayo de 2009)

#### **Resumen**

La redefinición del programa de monitoreo para el control y la vigilancia de la calidad del agua potable del sistema de distribución de la ciudad de Cali (Colombia) incluyó la localización de estaciones de monitoreo para lo cual se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG). La integración de información de diferente índole con este sistema permitió establecer las zonas prioritarias para localización de dichas estaciones en el área de estudio de acuerdo con la normatividad nacional vigente. Con la metodología desarrollada en este estudio y de acuerdo con el porcentaje de población abastecida, se recomendó la localización de 72 estaciones distribuidas en los 4 subsistemas: 1 estación en la red Pance, 3 en la red Reforma, 12 en la red Alta y 56 en la red Baja. Esta metodología puede ser aplicable en cualquier Sistema de Distribución de Agua (SDA), siempre y cuando se disponga de la información requerida, lo cual evidencia la importancia de una adecuada documentación de todos los procedimientos asociados con la producción y distribución de agua para consumo humano, tal como se considera en los Planes de Seguridad del Agua (PSA). Los resultados de este trabajo representan un avance en la construcción de los mapas de riesgo de los sistemas de abastecimiento de agua.

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 +2 + 321 22 66, fax: + 57 + 2 + 331 21 75, correo electrónico: caromoto@gmail.com (C. Montoya)

----- *Palabras clave:* Estaciones de monitoreo, mapas temáticos, programa de monitoreo, calidad de agua, sistema de distribución de agua, sistema de información geográfica.

### **Abstract**

The redefinition of the monitoring program for the control and surveillance of drinking water quality in the distribution system of the city of Cali (Colombia) included the location of monitoring stations using a Geographic Information System (GIS). The integration of different kinds of information allowed the establishment of priority areas for locating these stations in accordance with existing national legislation. With the methodology developed in this study and in accordance with the percentage of population served, the location of 72 stations distributed in the 4 subsystems was recommended: 1 station in the network Pance, 3 in the network Reforma, 12 in the network Alta and 56 in the network Baja. This methodology can be applied in any water distribution system, subject to the availability of the required information, which shows the importance of proper documentation of all procedures associated with the production and distribution of water for human consumption as considered in the Water Safety Plans (WSP). The results of this study represent a breakthrough in the building of risk maps of the water supply systems.

----- *Keywords:* Monitoring stations, thematic maps, monitoring program, water quality, water distribution system, geographic information system.

### **Introducción**

El acceso al agua potable y a condiciones adecuadas de saneamiento es esencial para la salud, un derecho humano básico y un componente de la política para la protección de la salud [1]. Teniendo en cuenta que el abastecimiento de agua debe garantizar tanto la cantidad como la calidad del agua que llega al consumidor, las últimas tendencias en el sector de agua potable están orientadas al desarrollo y aplicación de metodologías para la identificación, evaluación y control de los riesgos que se presentan en un sistema de abastecimiento, así como a la formulación de programas de vigilancia y control de la calidad de la misma.

La aplicación de los Planes de Seguridad del Agua (PSA) es una práctica recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Oficina de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) orientada a controlar no sólo la ca-

lidad final del agua, sino también a aplicar múltiples barreras de control dentro de todo el proceso de captación, producción y distribución de agua potable. Los objetivos principales de los PSA pretenden garantizar el control de la contaminación de la fuente de abastecimiento, su reducción y remoción en los procesos de tratamiento y la prevención de contaminación en el almacenamiento y la distribución del agua tratada [2].

Los sistemas de distribución de agua (SDA), compuestos por tuberías, bombas, válvulas, almacenamientos, medidores, hidrantes, acoples y otros accesorios hidráulicos, representan la mayor infraestructura física en el sistema de abastecimiento y por lo tanto es muy importante comprender las causas de los cambios sustanciales que pueden ocurrir en el agua desde que sale de la planta de potabilización hasta que llega al consumidor. Tales causas pueden estar asociadas con diferentes fenómenos que afectan la integridad fi-

sica, hidráulica y de calidad de agua en el sistema como formación de subproductos de la desinfección durante y después del proceso de tratamiento, interacción con los materiales utilizados en el sistema, formación de biopelícula en los diversos componentes del SDA, efecto de contraflujo en tramos de tuberías, bajas presiones y eventos que alteran el normal funcionamiento de la red (actividades de construcción, reparación y mantenimiento), entre otros. Por lo tanto, los SDA pueden llegar a constituirse en una fuente de contaminación del agua y requieren ser estudiados con el fin de caracterizar los riesgos e identificar estrategias operativas para disminuirlos [3].

El control de riesgos en un SDA debe incluir medidas asociadas con la planeación, diseño, operación y mantenimiento del sistema. En general, para minimizar los riesgos es necesario garantizar una adecuada separación entre las redes y las potenciales fuentes de contaminación tales como alcantarillados sanitarios y pluviales; minimizar la edad del agua; evitar bajas velocidades; garantizar una presión mínima de 14 m.c.a. aún en los extremos de la red; evitar zonas muertas que faciliten la acumulación de sedimentos; mantener una adecuada mezcla al interior de los tanques de almacenamiento y un nivel de desinfectante residual apropiado en todo el sistema; ejecutar regularmente un plan de mantenimiento de redes y tanques de almacenamiento (inspección, lavado y desinfección), bombas y válvulas para evitar presiones bajas o negativas que favorezcan el ingreso de contaminantes al sistema (riesgo de intrusión); aplicar buenas prácticas de higiene en las labores de construcción y reparación de daños en las redes y reducir el nivel de nutrientes en el agua tratada para limitar la formación de biopelícula, entre otras [3, 4, 5].

Un adecuado programa de monitoreo se constituye en una herramienta útil para la vigilancia y el control de la calidad del agua en los SDA y por consiguiente, para la protección de la salud pública. Así mismo, los resultados de un programa de monitoreo permiten a los administradores del servicio de abastecimiento de agua orientar la toma de decisiones, tanto en la operación y man-

tenimiento del sistema, como en la planeación, diseño y gestión del mismo.

Como se observa en la figura 1, la formulación de un programa de monitoreo de calidad de agua debe responder a los interrogantes *¿qué, dónde, cuánto y cuándo, cómo y para qué medir?*, cuyas respuestas deben estar sujetas al cumplimiento de la normatividad local vigente sobre el tema y a la consideración de criterios técnicos, recomendaciones de organismos nacionales e internacionales y resultados de investigaciones pertinentes enfocadas a la identificación y control de riesgos en los SDA.



**Figura 1** Componentes de un programa de monitoreo de calidad de agua potable

Con el fin de responder al interrogante *¿dónde medir?*, es decir a la localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua potable en el SDA de la ciudad de Cali, se desarrolló una metodología que involucrara información relacionada con riesgos en la red de distribución, integrándola en un SIG que es una herramienta ampliamente usada en la identificación de riesgos en los SDA [6-10]. La importancia de los SIG radica en su utilidad para la toma de decisiones técnicas, administrativas y económicas, teniendo en cuenta grandes extensiones terrestres ya que, en general, la solución a muchos problemas requiere acceder a diversa información que sólo puede ser relacionada con la geografía [11].

En el caso de los SDA, la información digitalizada y georeferenciada de las plantas de potabilización, redes de distribución (materiales, diámetros y edades de tuberías, etc.), sistemas de almace-

miento y estaciones de bombeo puede observarse en un SIG en conjunto con información georeferenciada sobre quejas de calidad de agua, daños en la red, presiones en el sistema, demandas de agua, zonas muertas, edades del agua, densidades poblacionales y los resultados de modelaciones del sistema, así como del monitoreo rutinario y eventual de calidad de agua, entre otras. La superposición o integración de esta información es de gran utilidad para la construcción de mapas de riesgo y la localización de estaciones de monitoreo [11].

Generalmente, el monitoreo de la calidad del agua potable en las redes de distribución se

realiza en el punto final del sistema (grifo), por lo cual la localización de puntos de monitoreo en un SDA debería ser tal que la red esté representada por el número mínimo de éstos que permitan la obtención de información representativa de lo que sucede con la calidad del agua en toda la red, teniendo en cuenta que un programa de monitoreo puede variar con el tamaño y vulnerabilidad del sistema. En la tabla 1 se presentan los criterios que deben considerarse para localizar estaciones de monitoreo de agua potable en una red de distribución, de acuerdo con las recomendaciones de diversos autores.

**Tabla 1** Criterios para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua potable en un SDA

<b>Criterio</b>	<b>Fuente bibliográfica</b>
Análisis de datos históricos de calidad de agua	▪ [12, 13]
Tiempo de residencia del agua (edad del agua)	▪ [13, 14]
Puntos particulares del sistema tales como fuentes no protegidas, almacenamientos, zonas de baja presión, extremos de la red	▪ [12, 15, 16]
Zonas de baja presión (menor a 14 m.c.a)	▪ [3, 4]
Distribución de la población	▪ [15]
En el caso de redes ramificadas, el número de puntos de muestreo debe ser proporcional al número de uniones o bifurcaciones en la red. Igualmente para el caso de redes malladas sectorizadas	▪ [15]
Los puntos seleccionados deben ser representativos de todo el sistema y de sus componentes principales	▪ [12, 15]
Los puntos deben seleccionarse de tal manera que pueda obtenerse muestras de agua de los tanques de almacenamiento	▪ [12]
En el caso de que un sistema tenga más de una fuente de abastecimiento, debe considerarse el número de habitantes abastecido por cada fuente	▪ [12]
Al menos tener un punto de muestreo a la salida de la planta	▪ [12]
Material y edad de la tubería	▪ [14, 17, 18]

La legislación vigente en Colombia en el sector de agua potable (Decreto 1575/2007 [19], Resoluciones 2115/2007 [20] y 0811/2008 [21]) establece las características y frecuencias de muestreo y los lineamientos para definir la localización de puntos de monitoreo, así como el número

mínimo requerido de éstos de acuerdo con la población abastecida. En el caso de la ciudad de Cali (Colombia), se debe contar mínimo con 72 estaciones de monitoreo de calidad de agua, entre fijas (plantas de potabilización, tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo) y de

interés general. Para su localización se deben tener en cuenta, entre otros, los siguientes criterios:

1. Inicio y extremos de la red de distribución, tanques de almacenamiento o compensación y sistemas de bombeo con almacenamiento en la succión.
2. Representatividad del funcionamiento hidráulico del sistema de distribución de agua en su conjunto y en sus principales componentes: entradas de agua al sector correspondiente en redes sectorizadas, sectores de mayor riesgo desde el punto de vista de contaminación del agua y puntos donde ocurra mezcla del agua proveniente de las diferentes fuentes de abastecimiento o plan-

tas de tratamiento de agua que ingresan al SDA.

3. Distribución uniforme de los puntos de monitoreo a lo largo y ancho del SDA.
- 4- Presencia de riesgos para la población por algún evento natural o antrópico que pueda alterar la calidad del agua.
- 5- Quejas de los usuarios relacionadas con la calidad del agua, daños en las tuberías o baja presión.

El sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Cali cuenta con cuatro fuentes superficiales de agua y está constituido por cinco (5) plantas de potabilización, como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2** Sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Cali

<i>Fuente de abastecimiento (Río)</i>	<i>Planta de potabilización</i>	<i>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</i>		<i>Red</i>	<i>Población abastecida (%)</i>	<i>Tratamiento utilizado</i>
		<i>Diseño</i>	<i>Operación</i>			
Cauca	Río Cauca	2,5	1,3	Baja	77,0	Ciclo completo más tratamientos específicos como adsorción con carbón activado.
Cali	Puerto Mallarino	6,6	4,1			
Meléndez	Río Cali	1,8	1,2	Alta	17,1	Ciclo completo
Pance	La Reforma	1,0	0,4	Reforma	5,7	Ciclo completo, incluyendo opción de filtración directa para aguas con baja turbiedad.
Total	La Ribera	0,014	0,014	Pance	0,2	Filtración por Múltiples Etapas (FiME).
		11,914	7,014	--	100	--

Fuente: [22]

En cuanto al SDA, la red de distribución tiene una longitud total de 2.703 km., compuesta por

un conjunto de tuberías de diámetros entre 25,4 y 1.422 mm. y diferentes materiales de tubería ta-

les como: hierro fundido, asbesto cemento, acero, CCP, PVC, PAD, hierro dúctil y hierro galvanizado. Adicionalmente, el SDA se constituye por 39 tanques de los cuales la mayoría tienen la función de compensar presiones en la red de distribución y por 9 estaciones de bombeo, de las cuales dos funcionan solamente en época de estiaje de los ríos Cali o Meléndez.

Para dar cumplimiento a la normatividad vigente establecida por los organismos de control competentes y consciente del autocontrol que debe ejercer el prestador del servicio sobre la calidad del agua potable en la red de distribución de la ciudad de Cali, EMCALI EICE ESP cuenta con un programa de monitoreo para el SDA que incluye todos los aspectos contemplados en la normatividad y que han sido ajustados a lo largo del tiempo de acuerdo con el desarrollo poblacional y la utilización de nuevas fuentes para el abastecimiento agua. Ante los nuevos desarrollos conceptuales en el abastecimiento de agua segura y, de acuerdo con criterios técnicos y modificaciones en la normatividad, en este artículo se presenta una propuesta metodológica a través del uso de un SIG para la localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua potable en la red de distribución de la ciudad de Cali, la cual puede ser aplicada en otros SDA.

### Metodología

La figura 2 ilustra la metodología establecida para la localización de estaciones de monitoreo de agua potable, la cual partió de un análisis de la reglamentación nacional vigente en el sector de agua potable. Posteriormente, se definieron los criterios técnicos y recomendaciones de organismos nacionales e internacionales que trabajan en el tema de abastecimiento de agua, para luego realizar la superposición de capas por criterio e identificar zonas prioritarias para la localización de las estaciones.

#### Definición de criterios

Idealmente, para la localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua en un SDA de-

ben considerarse aspectos físicos (subsistemas del SDA, daños en la red de distribución, edad y material de la tubería), hidráulicos (edad del agua, extremo de red, variaciones de presión en la red, demandas de agua) y de calidad de agua (variación histórica de calidad de agua, quejas de calidad de agua, presencia de biopelícula en el sistema), así como las características demográficas y usos del suelo en el área de interés. En este caso particular y de acuerdo con la información disponible en la empresa prestadora del servicio, se definieron cuatro grupos de criterios para la localización de estaciones de monitoreo:

1. Físicos: fuentes de abastecimiento y subsistemas del sistema de distribución de agua, puntos extremos de red y daños en la red de distribución.
2. Hidráulicos: presión mínima en la red.
3. Calidad de agua: variación histórica de la calidad del agua potable (periodo 2000-2006) y quejas por calidad de agua.
4. Usos del suelo y otros: concentración institucional, densidad poblacional y cobertura del área atendida

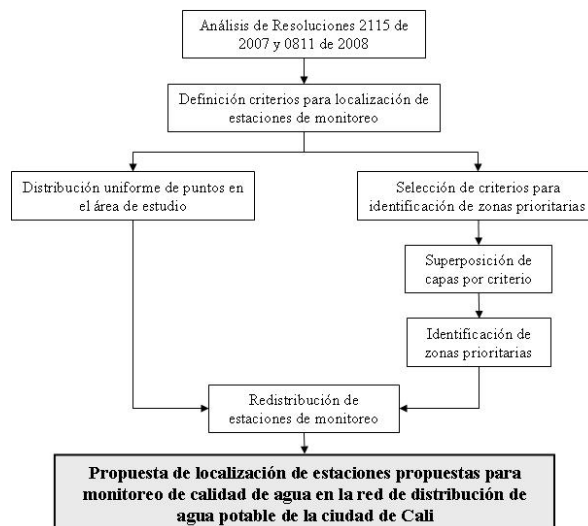


Figura 2 Esquema metodológico para la selección de estaciones de monitoreo de calidad de agua potable

### *Distribución uniforme de estaciones en el SDA de la ciudad de Cali*

Para garantizar la cobertura del área atendida y la distribución uniforme de las estaciones en todo el área de estudio, inicialmente se procedió a ubicar puntos correspondientes al centroide de un cuadrado de área igual a 2 km<sup>2</sup> (lado= $\sqrt{2}$  km.) para obtener aproximadamente 72 puntos.

### *Identificación de zonas prioritarias para localización de estaciones de monitoreo*

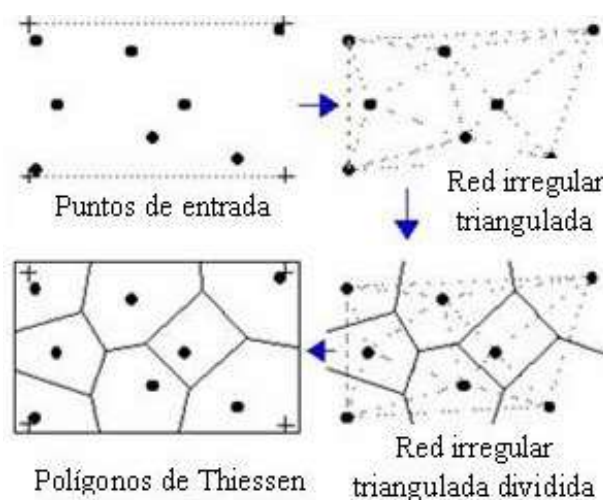
Con el fin de encontrar zonas prioritarias para el monitoreo de la calidad del agua potable en la red de distribución, se elaboraron mapas temáticos empleando un programa especializado en SIG (ArcGis V 9.0), el cual presenta la información en capas y facilita su visualización.

El primer paso para la generación de las diversas capas de los mapas temáticos fue depurar la información primaria (cartografía, bases de datos, reportes, etc.) para que pudieran ser integradas al sistema. En el caso de la cartografía, se ajustó para que su topología fuera la adecuada (punto, línea y polígono) y las bases de datos cumplieran con ciertas características de uniformidad y orden. Por las características de la información disponible, se integraron los datos de cuatro criterios con el sistema ArcGis y los restantes (subsistemas del SDA, variación histórica de la calidad del agua, extremos de red y concentración institucional) se consideraron a nivel cualitativo para redistribuir las estaciones en las zonas prioritarias identificadas. Los criterios integrados fueron:

1. Quejas de calidad de agua por barrio del año 2006.
2. Daños en la red por barrio del año 2006.
3. Densidad poblacional por comuna, según el censo nacional del DANE realizado en el 2005.
4. Presión mínima diaria por manómetro en el año 2006.

Como se mencionó anteriormente, todas las capas correspondientes a los criterios indicados fueron

integradas en el programa ArcGis V 9.0, las cuales se encuentran en coordenadas del municipio de Santiago de Cali. Las tres primeras capas son de tipo polígono mientras que la capa de presión mínima corresponde a datos puntuales generados en los diferentes manómetros de la red de distribución, por lo cual fue necesario asignarle un carácter de área, generando polígonos de Thiessen y, de esta manera, asociar a cada polígono su respectivo valor de presión. En la figura 3 se observa cómo los polígonos de Thiessen son generados a partir de un conjunto de puntos y se definen por la bisectriz de las líneas entre éstos.



**Figura 3** Ejemplo de generación de polígonos de Thiessen

Fuente: Adaptado de [23]

Las capas en formato vectorial (*shape*) fueron convertidas a formato malla (*raster*) para relacionar su información. Una vez se contó con las cuatro capas en formato malla, se establecieron puntajes y pesos como se muestra en la tabla 3 con el fin de clasificar los datos de cada capa. Respecto a los puntajes, los datos se agruparon en cuatro rangos para asignarle a cada uno un puntaje entre cero (0) y cien (100) y los pesos de cada criterio se establecieron de acuerdo con la influencia que ejerce cada uno sobre la calidad del agua potable en la red de distribución bajo las condiciones actuales y según el resultado de la aplicación de encuestas a varios profesionales con experiencia en el tema.

**Tabla 3** Puntaje y peso de cada criterio -Reclasificación de capas

<i>Criterio</i>	<i>Unidades</i>	<i>Rango</i>	<i>Puntaje</i>	<i>Peso criterio</i>
Daños en la red de distribución	No. daños año 2006	0-10	25	30%
		11-30	50	
		31-50	75	
		> 50	100	
Presión mínima	% (*) Año 2006	0-10	25	30%
		10,01-40	50	
		40,01-70	75	
Quejas por calidad de agua	No. quejas año 2006	70,01-100	100	20%
		0-10	25	
		11-30	50	
		31-50	75	
Densidad poblacional	Hab/Ha Censo 2005	> 50	100	20%
		0-10	25	
		10,01-100	50	
		100,01-250	75	
		250,01-400	100	

(\*) Porcentaje de datos menores a 14 m.c.a sobre el total de datos de presión diaria mínima del año 2006

Una vez realizada la reclasificación de las capas, éstas se integraron, como se observa en la figura 4, para obtener las zonas prioritarias para la localización de las estaciones a través de una ponderación entre el puntaje y el peso de cada criterio de acuerdo con la ecuación 1.

$$Valor\ total = \sum_{i=1}^4 (Puntaje_{Ci} \times Peso_{Ci}) \quad (1)$$

Donde:

Valor total: resultado de la ponderación

Puntaje: puntaje de acuerdo con el valor del criterio

Peso: peso de cada criterio

Ci: criterios considerados para la integración

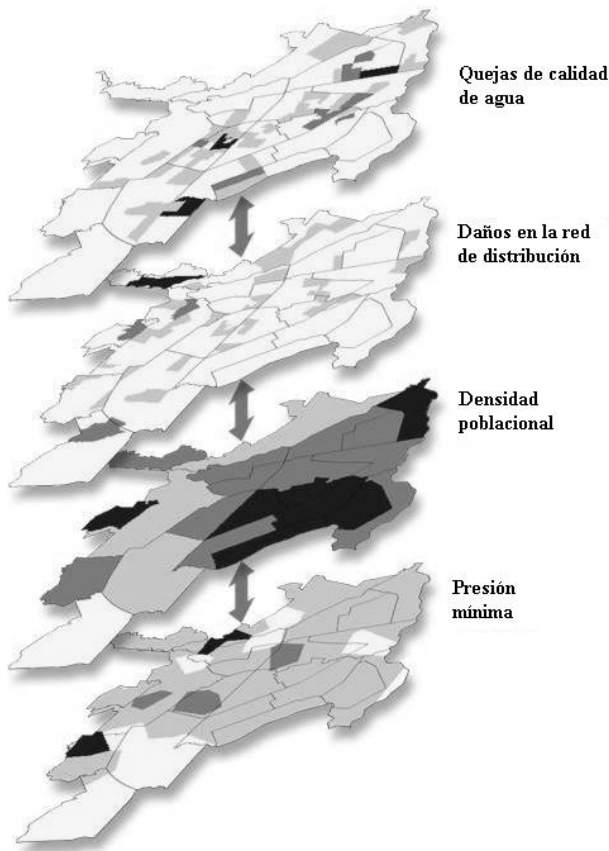
### *Redistribución de estaciones de monitoreo de calidad de agua*

De acuerdo con la reglamentación, se consideraron las plantas de potabilización, tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo como puntos fijos de monitoreo, mientras que fueron distribuidos en todo el SDA 72 puntos variables que pueden ser cambiados periódicamente con el fin de contar con información de calidad de agua en una amplia extensión de la red o cuando las circunstancias así lo requieran.

La redistribución de estaciones de monitoreo variables se realizó considerando el porcentaje de población abastecida según la fuente superficial, las zonas de concentración institucional (educativas, recreativas, médicas y comerciales), los extremos de red y la variación histórica de calidad de



agua del periodo 2000-2006 que permitió definir la permanencia de puntos tradicionales de monitoreo. Así, la redistribución se realizó a partir de los 68 centroides obtenidos, reubicando aquellos que quedaron en zonas de difícil acceso y adicionando 4 puntos más para completar el número mínimo estipulado en la normatividad, los cuales se trasladaron a zonas de alta prioridad, zonas de concentración institucional o extremos de red.

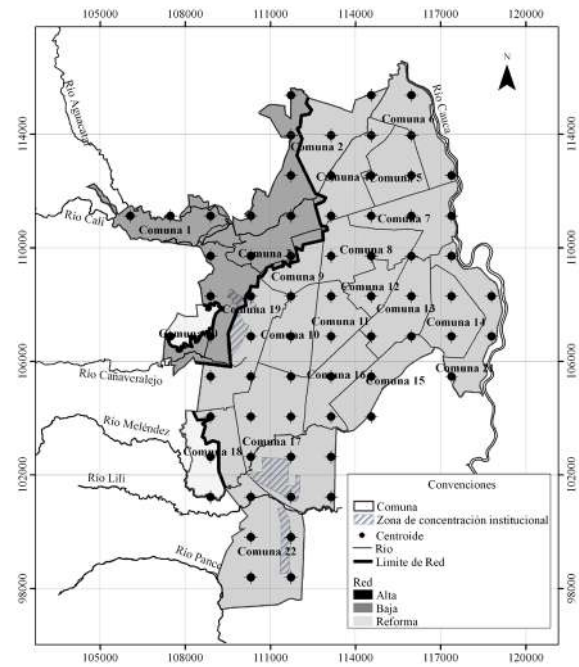


**Figura 4** Integración de capas para identificación de zonas prioritarias

## Resultados y discusión

### *Distribución uniforme de estaciones en el SDA de la ciudad de Cali*

A partir de la ubicación de los centroides de los cuadrados de área igual a 2 km<sup>2</sup> se obtuvieron 68 puntos que se muestran en la figura 5.

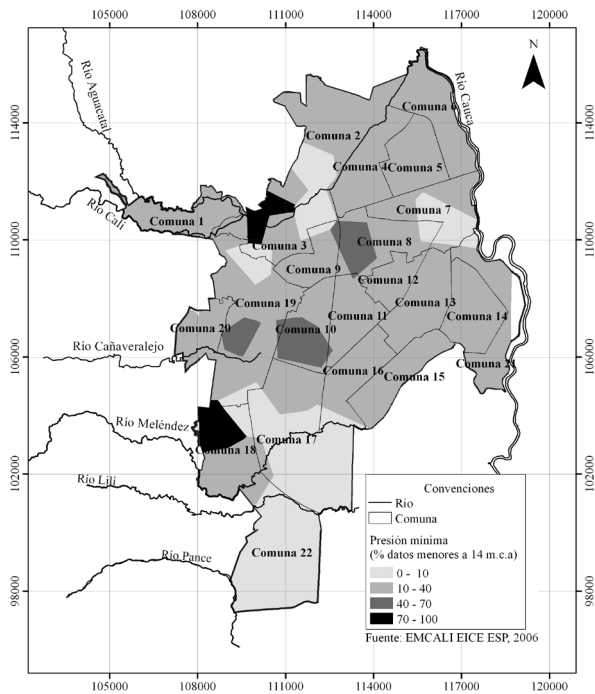


**Figura 5** Distribución uniforme de centroides de áreas de 2 km<sup>2</sup> -ciudad de Cali

En la figura anterior puede observarse que, de acuerdo con la extensión de los subsistemas del SDA de la ciudad de Cali, el mayor número de centroides quedaron ubicados en la red Baja y el menor número en la red Reforma. Inicialmente, si no se contara con los insumos e información mínima requerida para aplicar la metodología desarrollada en este estudio, la distribución uniforme de puntos puede ser una alternativa para la selección de estaciones de monitoreo.

### *Zonas prioritarias y localización de estaciones de monitoreo*

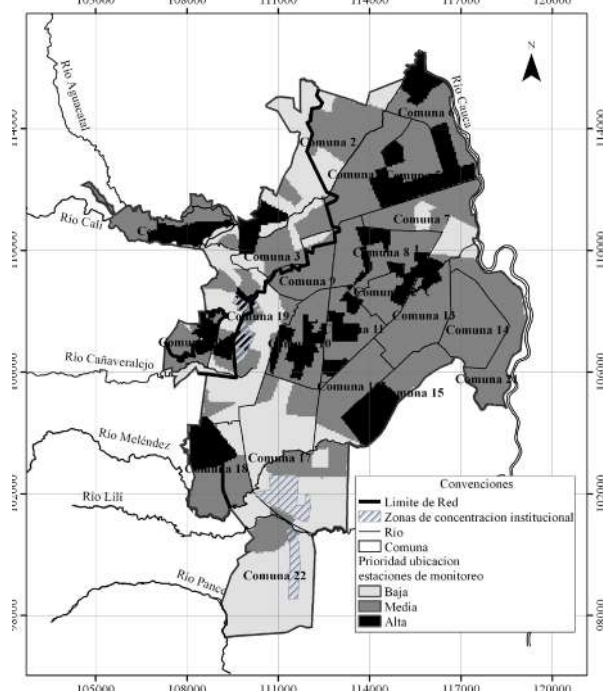
Una vez establecidos y clasificados los criterios considerados para la identificación de zonas prioritarias de acuerdo con los rangos, se obtuvo la clasificación de los datos de cada una de las capas como se muestra en la figura 6. A través de la ponderación de estos criterios con sus pesos y puntajes, se obtuvieron las zonas clasificadas en alta, media y baja prioridad para la localización de las estaciones, tal como se ilustra en la figura 7.



**Figura 6** Reclasificación de capas de acuerdo con los puntajes

La figura 6 muestra los sectores de la ciudad con mayor número de daños en el año 2006 (>31), mayor porcentaje de datos de presión diaria mínima en la red para el mismo año (>40%), mayor número de quejas de calidad de agua (>30) y densidades poblacionales más altas (>250 Hab/Ha). Como se observa en la figura 7, la distribución de áreas por zonas corresponde al 15,7% para alta prioridad y 55,1 y 29,2% para media y baja prioridad, respectivamente.

Finalmente, con las zonas prioritarias identificadas y a partir de la redistribución de puntos, se obtuvieron las 72 estaciones propuestas para el control y la vigilancia de la calidad del agua potable en el SDA de la ciudad de Cali, distribuidas por subsistema de acuerdo con la tabla 4. En la figura 8 se observan las estaciones de monitoreo propuestas, 10 de las cuales se conservaron del programa de monitoreo vigente en el año 2007.



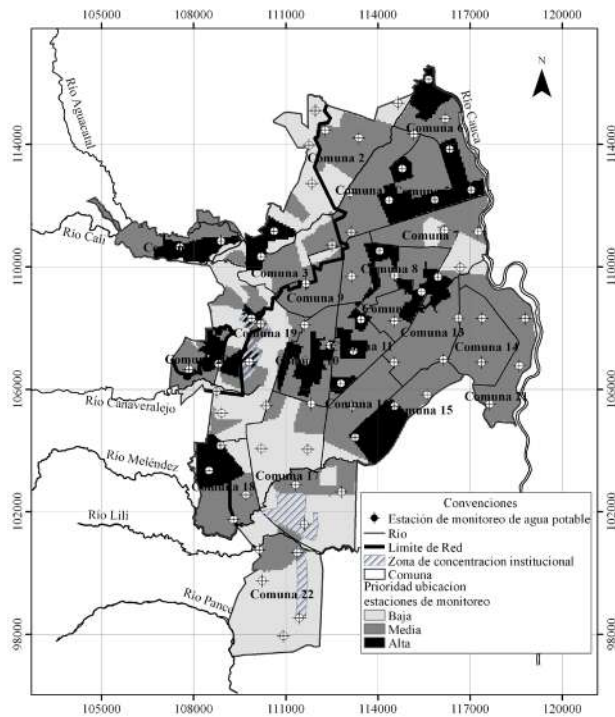
**Figura 7** Zonas prioritarias para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua potable en la red de distribución de la ciudad de Cali

**Tabla 4** Distribución estaciones de monitoreo por redes

Red	Porcentaje población abastecida*	N.º estaciones de monitoreo según porcentaje población abastecida	Distribución propuesta estaciones monitoreo
Pance	0,2	0,14	1
Reforma	5,7	4,10	3
Alta	17,1	12,32	12
Baja	77,0	55,44	56
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>72</b>	<b>72</b>

\* Fuente: [22]

Finalmente, en la figura 8 pueden observarse las 72 estaciones de monitoreo de calidad de agua potable en el SDA de la ciudad de Cali, con las cuales se garantizó el monitoreo en toda el área de estudio, al menos una estación en cada zona de concentración institucional identificada y mayor cobertura en las zonas de alta prioridad.



**Figura 8** Localización de estaciones de monitoreo de acuerdo con las zonas prioritarias

## Conclusiones

Actualmente, el interés de investigadores y administradores de los sistemas de abastecimiento de agua potable se ha dirigido hacia los SDA principalmente en la identificación de riesgos para la salud pública que puedan estar presentes en ellos. Los SIG se convierten entonces en una herramienta de mucha utilidad para el monitoreo, operación, mantenimiento, planeación, gestión y diseño de éstos. Sin embargo, para obtener el máximo beneficio de ellos, es necesario que la información requerida esté disponible y sistematizada para que pueda ser integrada en estos sis-

temas. Las empresas prestadoras del servicio de abastecimiento de agua tienen el reto de orientar su planeación y gestión hacia una óptima administración de la información, de tal manera que puedan estar a la vanguardia en los desarrollos tecnológicos orientados a la identificación y manejo de riesgos en los SDA con el fin de garantizar agua segura a la población abastecida.

En este estudio se desarrolló una metodología para la localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua potable en la ciudad de Cali. Dicha metodología tuvo en cuenta información relacionada con los nuevos desarrollos conceptuales de suministro de agua segura (integridad física, hidráulica y de calidad de agua de los SDA) y representa una exploración sobre elaboración de los mapas de riesgo de los sistemas de abastecimiento de agua en el territorio nacional, reglamentados en el Decreto 1575 de 2007 [19].

Un parámetro hidráulico importante para la localización de este tipo de estaciones es la edad del agua a lo largo de la red de distribución ya que su variación está estrechamente relacionada con el comportamiento de los niveles de cloro residual y trihalometanos y la formación de depósitos y biopelícula. Sin embargo, este criterio no se incluyó en la metodología ya que la información no estuvo disponible.

Es necesario resaltar que los programas de monitoreo de calidad de agua son variables en el tiempo de acuerdo con la generación de datos de calidad de agua y de operación y mantenimiento de la red de distribución. Por esta razón, los programas de monitoreo deben revisarse, evaluarse y ajustarse de acuerdo con la variación de la información. La metodología desarrollada en este estudio permite actualizar y adicionar información de la operación y monitoreo del sistema de distribución de agua con el fin de validar periódicamente las zonas prioritarias para localización de las estaciones y así evaluar su permanencia en el programa de monitoreo de calidad de agua potable.

Se resalta que esta metodología es aplicable a cualquier SDA siempre y cuando se cuente con la

información mínima requerida, lo cual evidencia la importancia de una adecuada documentación de todos los procedimientos asociados con la producción y distribución de agua para consumo humano, tal como se considera en los PSA.

## Referencias

1. OMS. *Safe Piped Water. Managing Microbial Water Quality in Piped Distribution Systems*. Ed. IWA Publishing. London. 2004. pp. 168.
2. OMS. *Guidelines for drinking-water quality. First Addendum to Third Edition. Volume I. Recommendations*. Ed. WHO Press 2006. Geneva. 2006. pp. 595.
3. National Research Council. *Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks. Free Executive Summary*. 2006. Disponible en: <http://www.nap.edu/catalog/4937.html>. Consultada el 15 de mayo de 2006.
4. EPA. *Effects of Water Age on Distribution System Water Quality*. 2002. Disponible en: [http://www.epa.gov/safewater/disinfection/tcr/pdfs/whitepaper\\_tcr\\_waterdistribution.pdf](http://www.epa.gov/safewater/disinfection/tcr/pdfs/whitepaper_tcr_waterdistribution.pdf). Consultada el 13 de diciembre de 2006.
5. OMS. *Water Safety Plans. Managing drinking-water quality from catchment to consumer*. Ed. WHO publications. Geneva. 2005. pp. 244.
6. P. C. Njemanze, J. Anozie, O. J. Ihenacho, J. M. Russell, B. A. Uwaeziozi. "Application of risk analysis and geographic information system technologies to the prevention of diarrheal diseases in Nigeria". *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. Vol. 61. 1999. pp. 356-360.
7. R. C. M. Nobre, O. C. Rotunno Filho, W. J. Mansur, M. M. M. Nobre, C. A. N. Cosenza. "Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool". *Journal of Contaminant Hydrology*. Vol. 94. 2007. pp. 277-292.
8. R. Sadiq, Y. K. Kleiner, B. Rajani. "Estimating Risk of Contaminant Intrusion in Water Distribution Networks Using Dempster-Shafer Theory of Evidence". *Journal Civil Engineering and Environmental Systems*. Vol. 23. 2006. pp. 129-141.
9. B. W. Samuels, R. Bahadur. "An integrated water quality security system for emergency response". *Security of Water Supply Systems: from Source to Tap*, Ed. Springer. Amsterdam. 2006. pp. 99-112.
10. K. Vairavamoorthy, J. Yan, M. H. Galgale, D. S. Gorantiwar. "IRA-WDS: A GIS-based risk analysis tool for water distribution systems". *Journal Environmental Modelling & Software*. Vol. 22. 2007. pp. 951-965.
11. EPA. *Water Distribution System Analysis: Field Studies, Modelling and Management. A Reference Guide for Utilities*". 2005. Disponible en: <http://www.epa.gov/ord/NRMRL/pubs/600r06028/600r06028.pdf>. Consultada el 15 de febrero de 2007.
12. E. E. Geldreich, *Microbial Quality of Water Supply in Distribution Systems*, Ed. Lewis Publishers, 1996. pp. 512.
13. M. J. Rodríguez, J. B. Sérodes. "Spatial and Temporal Evolution of Trihalomethanes in Three Water Distribution Systems". *Journal Water Research*. Vol. 35. 2001. pp. 1572-1586.
14. N. F. Gray. *Calidad del Agua potable. Problemas y Soluciones*. Ed. Acribia. Zaragoza. 1996. pp. 388.
15. OMS. *Guidelines for Drinking-water Quality. Second Edition. Surveillance and Control of Community Supplies*. Ed. WHO publications. Malta. Vol. 3. 1997. pp. 250.
16. I. Toroz, V. Uyak. "Seasonal variations of Trihalomethanes (THMs) in water distribution networks of Istanbul city". *Journal Desalination*. Vol. 176. 2004. pp. 127-141.
17. T. H. Heim, A. M. Dietrich. "Sensory Aspects and Water Quality Impacts of Chlorinated and Chloraminated Drinking Water in Contact with HDPE and cPVC Pipe". *Journal Water Research*. Vol. 41. 2007. pp. 757-764.
18. A. O. Al-Jasser. "Chlorine Decay in Drinking-water Transmission and Distribution Systems: Pipe Service Age Effect". *Journal Water Research*. Vol. 41. 2007. pp. 387-392.
19. Ministerio de la Protección Social, Decreto 1575 de 2007. Colombia.
20. Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 2115 de 2007. Colombia.
21. Ministerio de la Protección Social, Resolución 0811 de 2008. Colombia.
22. EMCALI EICE ESP, Departamento de Producción, Gerencia de Unidad Estratégica de Negocio de Acueducto y Alcantarillado. *Sistema de acueducto de la ciudad de Cali -documento interno*. Cali. 2006. pp. 13.
23. ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc.). *Guía electrónica del usuario ArcGis V. 9.0*. 2005.