

DOI : <https://doi.org/10.18359/rcin.6360>



## Diseño de una alternativa de suministro de agua para Vigía del Fuerte\*

Juan Daniel Ríos-Arboleda<sup>a</sup> ■ Francisco Javier Vélez-Hoyos<sup>b</sup>

■ Jonathan Anilio Gómez-Mosquera<sup>c</sup> ■ Camilo Alonso Restrepo-Asprilla<sup>d</sup>  
■ Sebastián Hernando Pérez-Laverde<sup>e</sup> ■ Víctor Hugo Aristizábal-Tique<sup>f</sup>

**Resumen:** en este trabajo se presenta un diseño a nivel de prefactibilidad de una alternativa mejorada para el suministro de agua al municipio de Vigía del Fuerte-Antioquia (Colombia). El diseño partió de la evaluación inicial de oferta hídrica y de calidad de agua del afluente Ñagaradó, corriente que demostró tener un alto potencial y viabilizó el diseño de la alternativa de suministro de agua. En este trabajo se dimensionaron los principales elementos del sistema como la estación de bombeo, la tubería de conducción, los tanques de almacenamiento y varios escenarios para la red de distribución.

**Palabras clave:** diseño de acueductos; Vigía del Fuerte-Colombia; suministro de agua; calidad de agua; Ñagaradó-Colombia

**Recibido:** 12/072022.

**Aceptado:** 02/12/2022.

**Disponible en línea:** 30/06/2023.

**Cómo citar:** Ríos-Arboleda JD, Vélez-Hoyos FJ, Gómez-Mosquera JA, Restrepo-Asprilla CA, Pérez-Laverde SH, Aristizábal-Tique VH. Diseño de una alternativa de suministro de agua para Vigía del Fuerte. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2023;33(1):61-74. <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.6360>

---

\* Artículo de investigación.

- a Magíster en ingeniería-recursos hidráulicos, ingeniero civil. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.  
Correo electrónico: [juan.riosar@campusucc.edu.co](mailto:juan.riosar@campusucc.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4863-9968>
- b Magíster en física, ingeniero físico. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.  
Correo electrónico: [francisco.velezh@campusucc.edu.co](mailto:francisco.velezh@campusucc.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4267-042X>
- c Ingeniero civil. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.  
Correo electrónico: [jonathan.gomez@campusucc.edu.co](mailto:jonathan.gomez@campusucc.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9821-3923>
- d Ingeniero civil. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.  
Correo electrónico: [jonathan.gomez@campusucc.edu.co](mailto:jonathan.gomez@campusucc.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6159-3885>
- e Ingeniero civil. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.  
Correo electrónico: [jonathan.gomez@campusucc.edu.co](mailto:jonathan.gomez@campusucc.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2848-2304>
- f Magíster en ciencias físicas, ingeniero físico. Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.  
Correo electrónico: [victor.aristizabalt@campusucc.edu.co](mailto:victor.aristizabalt@campusucc.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7880-5883>

## *Design of an Alternative Water Supply System for Vigia del Fuerte*

**Abstract:** This paper presents a pre-feasibility design of an improved water supply alternative for the municipality of Vigía del Fuerte-Antioquia (Colombia). The design was based on the initial evaluation of the water supply and water quality of the Ñagaradó tributary. This stream proved to have a high potential and made the design of the water supply alternative feasible. The main elements of the system, such as the pumping station, the pipeline, the storage tanks, and several scenarios for the distribution network, were dimensioned in this work.

**Keywords:** aqueduct design; Vigía del Fuerte-Colombia; water supply; water quality; Ñagaradó-Colombia.

## Introducción

Actualmente, tres de cada diez personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros, y seis de cada diez carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura [1]. Por otra parte, cerca de 1000 niños mueren a diario en el mundo debido a enfermedades diarreicas asociadas a la falta de higiene [1], razones por las que el agua se considera un recurso vital para el desarrollo de la vida y la prosperidad de una nación. Además, brindar acceso al agua potable es un desafío global que busca garantizar la calidad de vida y el desarrollo económico de las poblaciones [2], dando lugar a que se defina por la Naciones Unidas en el objetivo de desarrollo sostenible 6: agua limpia y saneamiento [1]. Especialmente, en países tropicales se ha encontrado que la calidad del agua y los indicadores socioeconómicos están estrechamente vinculados, y repercuten en las posibilidades de desarrollo de una población [3]. Más aún, algunos trabajos han incluido la salud en la ecuación del agua en términos de bienestar, morbilidad y mortalidad, asociados a tres factores de exposición: medio ambiente, comunidad y hogar [4], estos factores tienen relaciones bidireccionales y afectan los derechos de las personas para acceder este recurso natural [5].

Por otro lado, en países como la India [6] y Colombia, a pesar de contar con una disponibilidad hídrica favorable, en muchas regiones persiste la falta de agua potable debido a diversas razones tales como precaria infraestructura, contaminación con metales pesados y sólidos producto de la minería formal e informal [7]; además de la explotación de petróleo y gas, y de proyectos de generación de energía hidroeléctrica [8], y el vertimiento de residuos agrícolas y domésticos [9]. Algunas evaluaciones del efecto del cambio climático en Colombia han mostrado una reducción potencial del caudal generado por las cuencas hidrográficas [10], lo que podría afectar aún más el suministro de agua potable y de calidad en muchas regiones.

Centrándonos específicamente en el municipio de Vigía del Fuerte, ubicado en el Urabá Antioqueño-Colombia, el río Atrato es la fuente

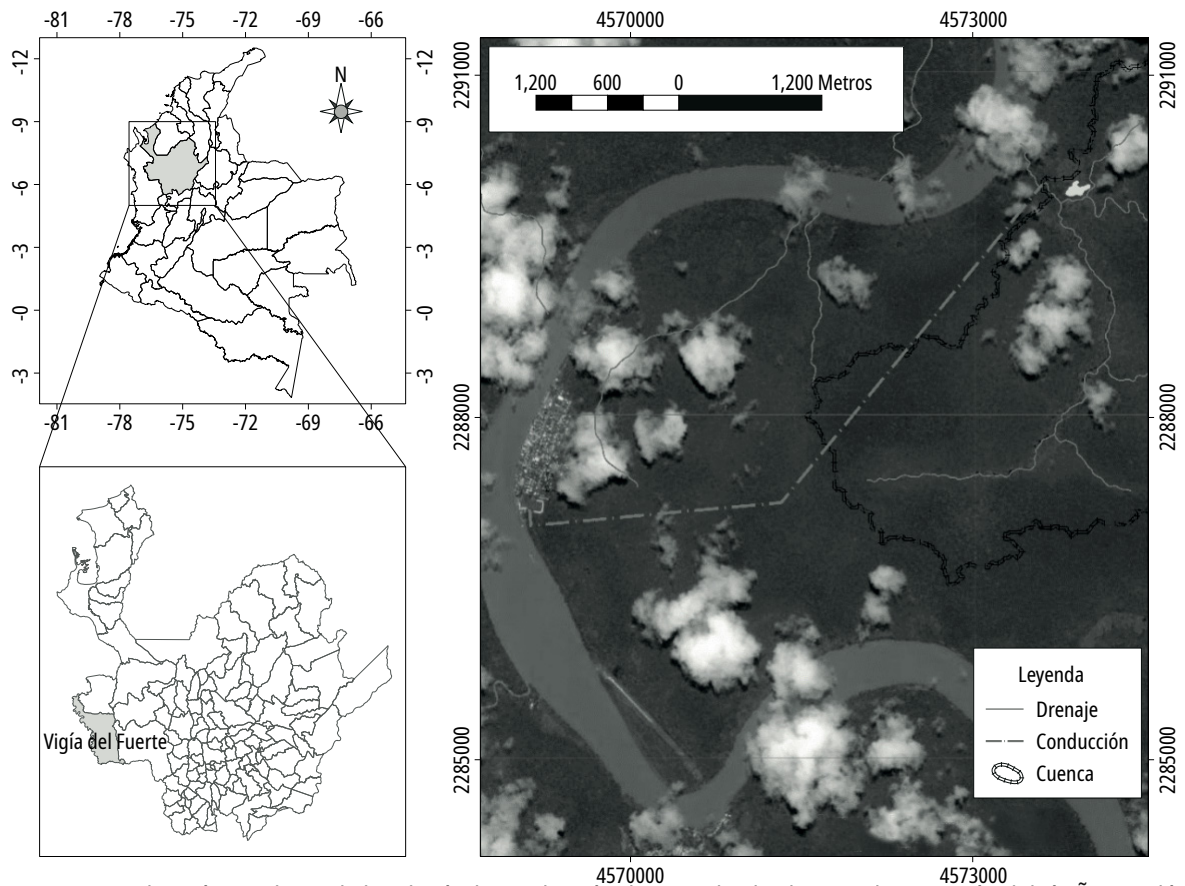
de abastecimiento del acueducto, lo cual implica captar el agua de un río caudaloso, con una carga considerable de sedimentos, característicos del trópico, que arrastra materia orgánica originaria de poblaciones aledañas que practican la minería industrial y la ilegal; por esta razón, el río exhibe cantidades significativas de plomo, cianuro, cobre y coliformes fecales [11], además, presenta un sistema de captación y distribución antiguo y con poco mantenimiento [12]. En este sentido, se han evidenciado concentraciones altas de metales pesados que superan los valores límites nocivos para la salud humana en personas que trabajan o viven en regiones aledañas al río o sus afluentes [13], por eso, utilizar el río como fuente de abastecimiento representa un riesgo latente para la salud pública. Lo anterior conduce a un déficit y una disponibilidad intermitente de agua potable en el municipio, sobre todo cuando la carga de sedimentos aumenta cada vez que hay una crecida del río, la cual puede ser generada por la presencia de lluvias en cualquiera de las cuencas de sus afluentes.

Por lo anterior, el alcance de este trabajo es realizar un diseño exploratorio de una alternativa para el suministro de agua al municipio de Vigía del Fuerte-Colombia, considerando el afluente Ñagaradó como fuente de captación principal. Para este fin, este documento está estructurado de la siguiente manera: primero, se hace una definición y descripción de la zona de estudio; segundo, se realiza un análisis de las condiciones climáticas actuales, de la oferta hídrica y de la calidad del agua del afluente; tercero, se efectúa un análisis multicriterio para la definición del alineamiento en planta de la conducción desde la fuente de captación hasta el municipio y la definición del alineamiento vertical de la tubería, además del dimensionamiento de la estación de bombeo y la selección de los materiales ideales para el contexto boscoso y selvático de la zona; y cuarto, se evalúa el comportamiento hidráulico del sistema de distribución actual y se proponen alternativas de mejoras. Por otro lado, se pretende resaltar la necesidad de una gestión sostenible del agua, especialmente en áreas con cambio demográfico y vulnerabilidad climática tal como han sugerido múltiples autores [14].



**Figura 1.** Panorámica de la cabecera municipal de Vigía del Fuerte ubicada en las coordenadas 06°35'20"N 76°53'42"W (izquierda), y del punto de captación en el afluente Ñagaradó, ubicado en las coordenadas 6°36'34.8192"N 76°51'22.5821"W (derecha)

Fuente: [16] y autores.



**Figura 2.** Localización en planta de la tubería de conducción de agua desde el punto de captación del río Ñagaradó hasta el municipio de Vigía del Fuerte

Fuente: elaboración propia

El aporte a la ingeniería de este trabajo es claro, puesto que se desarrolla una evaluación cuantitativa de la oferta y calidad del agua para suministro de un municipio, a bajo costo y con resultados escalables a producto de construcción, siendo este un referente pionero para la zona de estudio.

## Metodología

### Zona de estudio

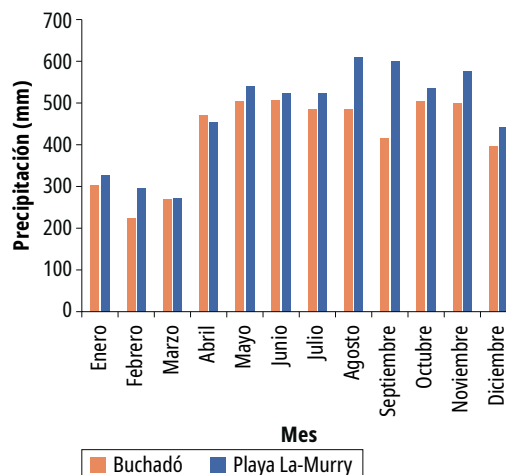
El municipio de Vigía del Fuerte (ver Figuras 1 y 2) se localiza al occidente del departamento de Antioquia, en vecindad con el departamento del Chocó y a orillas del río Atrato, a una altura promedio de 12 msnm, tal como se muestra en la figura 2. Según el censo del año 2018, efectuado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la población del municipio era de 3102 personas, de las cuales la mayoría pertenece a comunidades afrodescendientes [15]. La fuente alternativa de captación de agua aquí analizada corresponde al río Ñagaradó, (ver Figuras 1 y 2) localizado al nororiente del municipio, que a su vez es afluente del río Atrato. En el sitio de captación, la cuenca hidrográfica del río Ñagaradó presenta un área de 15,75 km<sup>2</sup>.

La zona se caracteriza por bajas pendientes y precipitaciones tropicales muy altas, según la clasificación climática mundial de Köppen que superan los 200 mm/mes (ver Figura 3) y los 5000 mm/año en las estaciones de medición de la zona. Además, presenta un ciclo unimodal con un periodo húmedo en el segundo semestre del año y un periodo más seco en el primer semestre del año, tal como se puede observar en la Figura 3. La estación Buchadó, ubicada al suroriente de la cabecera municipal, exhibe precipitaciones menores en los meses de julio, agosto y septiembre.

### Oferta hídrica y calidad del agua

Para analizar el potencial del río Ñagaradó, se procedió a evaluar la oferta hídrica (cantidad de agua disponible) y calidad del agua en un sitio de captación a 400 m antes de la desembocadura al río Atrato en las coordenadas 6°36'34.8192"N 76°51'22.5821"W (ver Figuras 1 y 2), siguiendo una

metodología similar a la empleada en [18] para la evaluación inicial.



**Figura 3.** Ciclo anual de precipitación comprendido entre el periodo 1981-2010 en las estaciones de medición más cercanas a la zona de estudio. La estación Buchadó está ubicada en las coordenadas 6°25'12.0" N 76°46'45.4" W, y Playa La-Murry en las coordenadas 6°37'00.0" N 76°45'00.0" W

Fuente: elaboración propia a partir de datos IDEAM [17].

Primero, dado que no existen series de caudal del río Ñagaradó, mediante la ecuación (1) se estimó el caudal medio  $Q_{medio}[m^3/s]$  de la fuente, empleando el método del balance hídrico de largo plazo [19], para una área de cuenca  $A[km^2]$  de 15,75 km<sup>2</sup>, una precipitación media anual  $P[mm/año]$  de 5065 mm (correspondiente a la estación Buchadó), y una evapotranspiración real media anual  $ETP[mm/año]$  de 1952 mm estimada con la ecuación de Turc dada por (2) [19].

$$Q_{medio} = \alpha A (P - ETR) \quad (1)$$

$$ETR = P / \sqrt{0.9 + P^2 / (300 + 25T + 0.05T^3)^2} \quad (2)$$

donde  $\alpha[m^3/s]$  es un coeficiente ( $4,01 \cdot 10^{-5}$ ) de conversión de unidades y  $T[°C]$  la temperatura media anual de 28 °C correspondiente a la estación Buchadó.

Segundo, empleando el caudal medio y las ecuaciones de regionalización (3) y (4), propuestas por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) [20], se calcularon la media  $\mu[m^3/s]$  y la



desviación estándar  $\sigma[m^3/s]$  de los caudales mínimos, con el fin de estimar mediante el análisis de frecuencia estos caudales en el afluente Ñagaradó para diferentes periodos de retorno  $Tr[año]$ .

$$\mu = C_\mu Q_{medio} \tag{3}$$

$$\sigma = C_\sigma Q_{medio} \tag{4}$$

donde  $C_\mu$  y  $C_\sigma$  son las constantes de caudal medio para la media y la desviación estándar de los caudales mínimos en cada región del país, según estudio de regionalización, que para la zona del Atrato es de 0,286 y 0,121, respectivamente [20].

Por último, se estimó para el afluente Ñagaradó el caudal mínimo  $Q_{Tr}[m^3/s]$  para un periodo de retorno  $Tr[año]$  mediante la ecuación para análisis de frecuencias propuesta por Ven Te Chow [21]:

$$Q_{Tr} = \mu + k_{Tr} \times \sigma \tag{5}$$

donde  $k_{Tr}$  es el factor adimensional de frecuencia, y la distribución de probabilidad de eventos extremos tipo I (distribución de Gumbel), se obtiene:

$$k_{Tr} = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} [0.5772 + \ln(\ln(Tr))] \tag{6}$$

Para evaluar la calidad del agua en el punto de captación del río Ñagaradó, se recolectaron muestras de agua en campo y se evaluaron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, siguiendo las normas e instrucciones para la toma, preservación y transporte reglamentadas en el decreto 1575 de 2007 [22].

## Diseño del sistema

Para el diseño de los elementos del sistema como la estación de bombeo, la conducción, el tanque de almacenamiento y la red de distribución se tuvieron en cuenta las Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. [23], y el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento RAS 2000 [24]. Inicialmente, para establecer la demanda de agua en la cabecera municipal de Vigía del fuerte se utilizaron los censos publicados por el DANE y compilados por el Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia (ver Tabla 1), y los métodos de proyección de población aritmético, geométrico, exponencial y Wappaus

[24] para un periodo de 25 años, los cuales son presentados a continuación:

**Tabla 1.** Población histórica de los censos hechos por el DANE [15]

| Año del censo |      | Población cabecera (habitantes) |      |
|---------------|------|---------------------------------|------|
| t0            | 1985 | H0                              | 1588 |
| t1            | 1993 | H1                              | 2916 |
| t2            | 2005 | H2                              | 2122 |
| t3            | 2018 | H3                              | 3102 |

Fuente: elaboración propia a partir de datos compilados por Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia [15].

### Método aritmético:

$$Hd = H3 + (H3 - H2) \left( \frac{td-t3}{t3-t2} \right) \tag{7}$$

donde:  $Hd$  es la población para el año de diseño  $td$ .

### Método geométrico:

$$Hd = H3(1 + r)^{td-t3} \tag{8}$$

donde:  $r = (H3/H2)^{1/(t3-t2)} - 1$  es la tasa de crecimiento geométrico anual.

### Método exponencial:

$$Hd = H0 e^{Rg \times (td-t0)} \tag{9}$$

donde:

$$Rg = \left[ \frac{\ln(H3)-\ln(H2)}{t3-t2} + \frac{\ln(H2)-\ln(H1)}{t2-t1} + \frac{\ln(H1)-\ln(H0)}{t1-t0} \right] / 3$$

es la tasa de crecimiento anual de la población, la cual se calculó como el promedio de las tasas calculadas para cada par de censos disponibles.

### Método Wappaus:

$$Hd = H0 \frac{200+i (td-t0)}{200-i (td-t0)} \tag{10}$$

donde:  $i = \frac{200 (H3 - H0)}{(t3 - t0)(H3 + H0)}$  es el índice de crecimiento anual de la población.

Además, se consideró una dotación neta de 140 L/Hab-día. El caudal medio diario  $Qmd[m^3/s]$

requerido por la población se estimó con la ecuación (11), considerando una dotación bruta  $dot_{bruta}$  de 147 L/Hab-día [25]:

$$Qmd = H \times dot_{bruta} \tag{11}$$

donde:  $H$  es la población proyectada (población de diseño). De igual forma, el caudal máximo diario  $QMD[m^3/s]$  [25] requerido para determinar el diámetro de la tubería de conducción desde la fuente (río Ñagaradó) hasta el municipio se estimó con la ecuación (12).

$$QMD = k1 Qmd \tag{12}$$

donde:  $k1$  es el coeficiente de punta diario o de demanda máxima diaria para poblaciones de diseño menores o iguales a 12 500 habitantes (Hab) definido por el RAS 2000 como 1,3 [25].

Se calcularon las pérdidas de energía entre el sitio de captación (abscisa K0+000) y el tanque de carga (abscisa K0+500) con la ecuación de Darcy-Weisbach, considerando una velocidad de flujo de 1,97 m/s y una rugosidad absoluta para tubería PEAD Acuaflex de PAVCO de 0,007 mm. El esquema de proyecto aquí planteado consiste en una estación de bombeo flotante en el río Ñagaradó que impulsa el agua desde la abscisa K0+000 (Figura 4) hasta un tanque de carga de 5 m de altura y un volumen de 500 m<sup>3</sup> en la abscisa K0+500 desde donde se distribuye el agua por gravedad hasta el municipio aprovechando la pendiente del terreno favorable (Figura 4):

Finalmente, se plantearon varios escenarios para la red de distribución, utilizando el software de diseño EPANET [26], herramienta para modelar sistemas de distribución de agua a nivel mundial, que permite comprender el movimiento y destino del agua potable dentro de los sistemas de distribución. La ecuación de pérdidas utilizada fue la Hazen-Williams con un coeficiente  $C$  de 150.

## Resultados

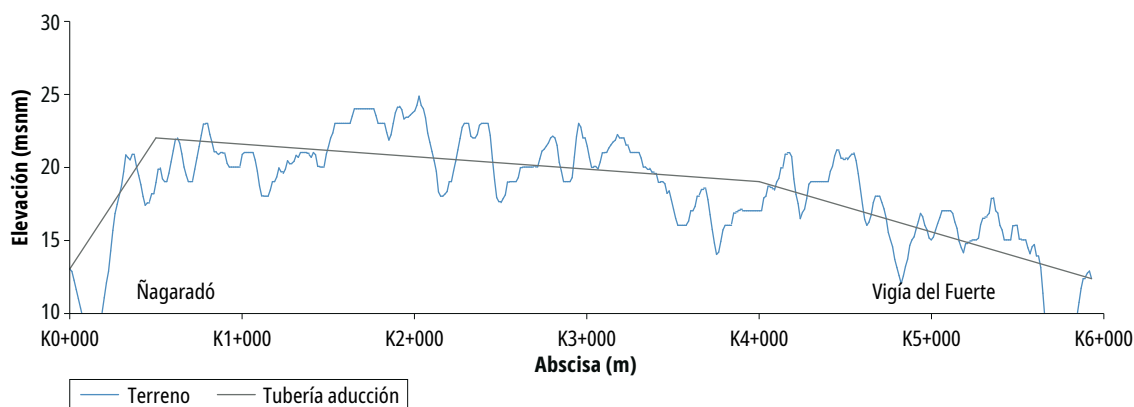
### Oferta hídrica y calidad del agua

Para el sitio de captación en el río Ñagaradó 400 m antes de la desembocadura al río Atrato, se estimó un caudal medio de 1,55 m<sup>3</sup>/s, y los caudales mínimos en función de  $Tr$  se muestran en la Tabla 2 y Figura 5.

**Tabla 2.** Caudales mínimos para distintos periodos de retorno

| Tr [años] | kTr    | QTr [m <sup>3</sup> /s] |
|-----------|--------|-------------------------|
| 2,33      | -0,320 | 0,385                   |
| 5,00      | -0,821 | 0,290                   |
| 10,00     | -1,100 | 0,238                   |
| 25,00     | -1,362 | 0,189                   |
| 50,00     | -1,514 | 0,160                   |
| 100,00    | -1,641 | 0,136                   |

Fuente: elaboración propia



**Figura 4.** Localización en perfil de la tubería de conducción de agua desde el río Ñagaradó hasta el municipio de Vigía del Fuerte. Escala H 1:1000, Escala V 1: 100

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, en la Tabla 3 se muestra los resultados (media y desviación estándar) del análisis de calidad del agua de 3 muestras tomadas en el punto de captación en febrero del 2021, donde se encontró que solo la turbidez, el color verdadero y el hierro total presentan valores por fuera de los umbrales aceptables según la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de la protección social [27]. Sin embargo, estos valores podrían llegar a estabilizarse durante el proceso de potabilización del agua cruda. Cabe resaltar que el análisis fisicoquímico y microbiológico fue realizado en un laboratorio debidamente acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) mediante Resolución 0849 de 2020 para la evaluación de dichos parámetros.

**Tabla 3.** Resultados de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos medidos en el punto de captación del río Ñagaradó

| Parámetro                                   | Resultado     | Valor aceptable |
|---|---------------|-----------------|
| Alcalinidad Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L) | 18,1 ± 1,1    | Si              |
| Cloruros (mg Cl/L)                          | <5000         | Si              |
| Color verdadero (UCoPt)                     | 83 ± 4        | No              |
| Conductividad (µS/cm)                       | 25,6 ± 0,5    | Si              |
| Dureza total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)      | 23,0 ± 1,8    | Si              |
| Fosfatos (mg PO <sub>4</sub> -L)            | <0,400        | Si              |
| Hierro total (mg Fe/L)                      | 3,347 ± 0,669 | No              |
| Manganeso Total (mg Mn/L)                   | 0,212 ± 0,011 | Si              |
| Nitratos (mg NO <sub>3</sub> - /L)          | <1000         | Si              |
| pH (Unidades de pH)                         | 6,85 ± 0,13   | Si              |
| Sulfatos (mg SO <sub>4</sub> -L)            | <5000         | Si              |
| Turbiedad (NTU)                             | 16,0 ± 0.6    | No              |
| Coliformes Fecales (NMP/100mL)              | 1200          | Si              |
| Coliformes Totales (NMP/100mL)              | 3000          | Si              |

Fuente: elaboración propia

## Diseño del sistema

En la Tabla 4 y Figura 5 se muestran las proyecciones estimadas de la población por los métodos descritos en la sección anterior. Además, se estimó la población para los años que reporta el DANE. En la Figura 5, se puede observar cómo se ajustan cada uno de estos modelos a los datos experimentales de población (censos). Con estas proyecciones fue posible determinar el caudal máximo diario ( $QMD = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}$ ) demandado por la población de diseño en el año 2045.

La solución planteada se compone de un sistema de bombeo entre el sitio de captación (abscisa K0+000 y elevación 37 msnm) y el tanque de carga (abscisa K0+500 y elevación 51 msnm, considerando una altura del tanque de carga de 5 m), además de una conducción en tubería de polietileno de alta densidad (PEAD) Acuaflex de PAVCO de 4" o 100 mm de diámetro nominal (101.60 mm de diámetro interior). Las pérdidas de carga estimadas en el tramo de impulsión (K0+000 a K0+500) ascienden a 22,14 metros columna de agua (mca), y sumadas a la cabeza estática (14 m) conforman una cabeza dinámica total de 36,14 mca, que desde lo técnico es un valor de energía razonable que puede ser entregado por una motobomba Diesel comercial (debido a la falta de fluido eléctrico en el sitio de captación) de 15 caballos de potencia (hp) o superior. Sin embargo, debido a que se considera bombear durante 12 horas del día, se deben colocar al menos cuatro bombas para que exista una redundancia en caso de falla.

Por otro lado, también se realizó el chequeo de presión en el tramo de impulsión (K0+000 a K0+500), encontrando una presión máxima a la salida de la bomba de 0,16 MPa, la cual es admisible perfectamente por la tubería de PEAD (presión admisible 6 bar o 0,6 MPa). Adicionalmente, es un material ideal para el ambiente boscoso y selvático de la zona, debido a la versatilidad de los empalmes por termofusión y flexibilidad del PEAD.

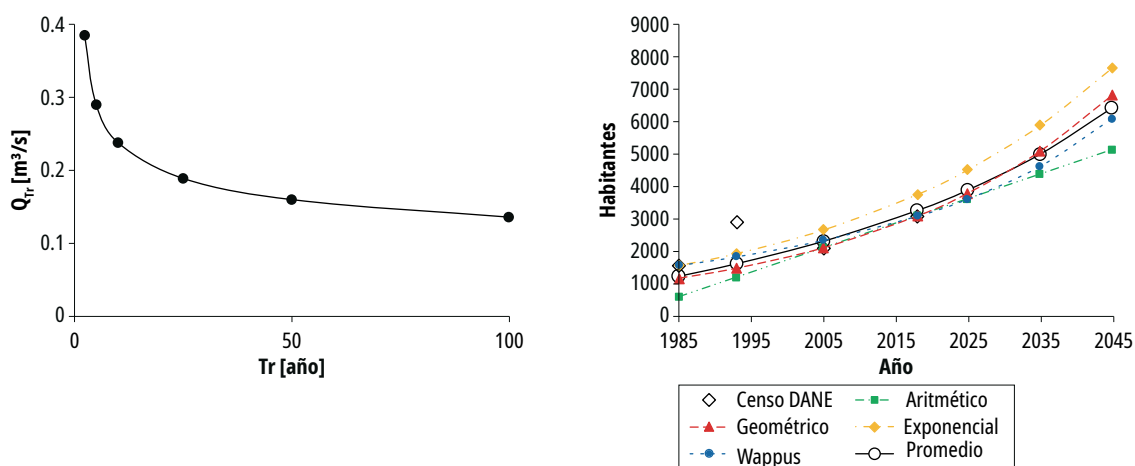
Finalmente, se completó la evaluación del sistema con la revisión de dos escenarios para la red de distribución, uno actual y uno proyectado.



**Tabla 4.** Estimación de la población de Vigía del fuerte por medio de diferentes métodos

| Año  | Censo DANE [habitantes] | Método [habitantes] |            |             |         |          |
|------|-------------------------|---------------------|------------|-------------|---------|----------|
|      |                         | Aritmético          | Geométrico | Exponencial | Wappaus | Promedio |
| 1985 | 1588                    | 614                 | 1183       | 1588        | 1588    | 1243     |
| 1993 | 2916                    | 1217                | 1495       | 1959        | 1858    | 1632     |
| 2005 | 2122                    | 2122                | 2122       | 2683        | 2361    | 2322     |
| 2018 | 3102                    | 3102                | 3102       | 3774        | 3102    | 3270     |
| 2025 |                         | 3630                | 3806       | 4534        | 3630    | 3900     |
| 2035 |                         | 4384                | 5097       | 5894        | 4629    | 5001     |
| 2045 |                         | 5137                | 6825       | 7661        | 6101    | 6431     |

Fuente: elaboración propia

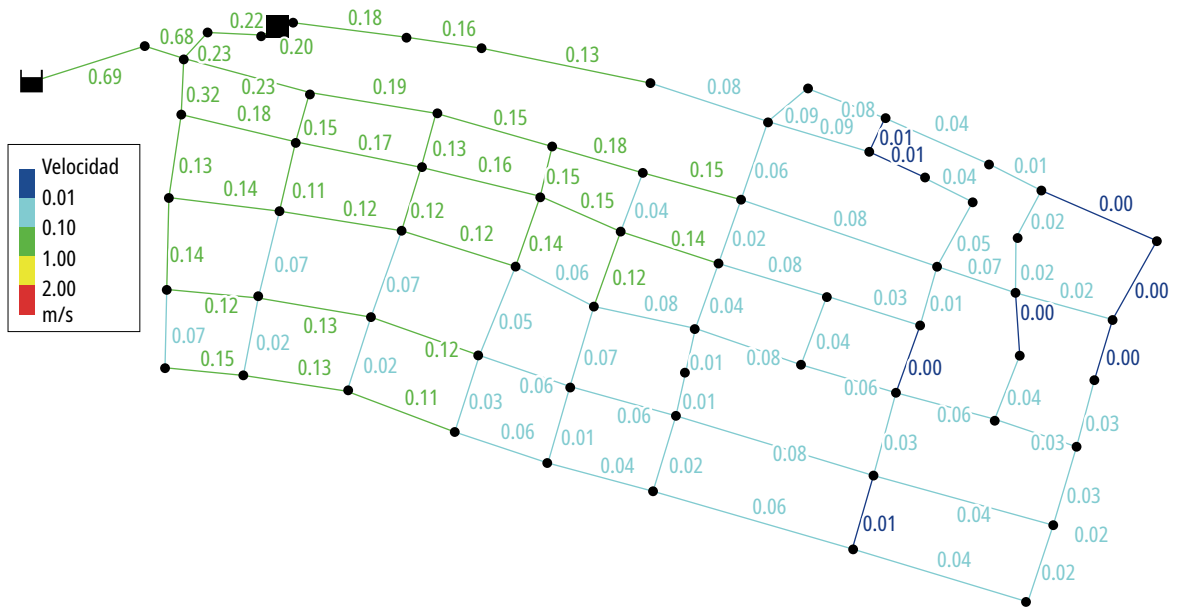


**Figura 5.** Caudal mínimo en función del periodo de retorno para el río Ñagaradó (izquierda), y curvas de ajustes estimadas por diferentes métodos para las proyecciones de población para Vigía del fuerte (derecha)

Fuente: elaboración propia

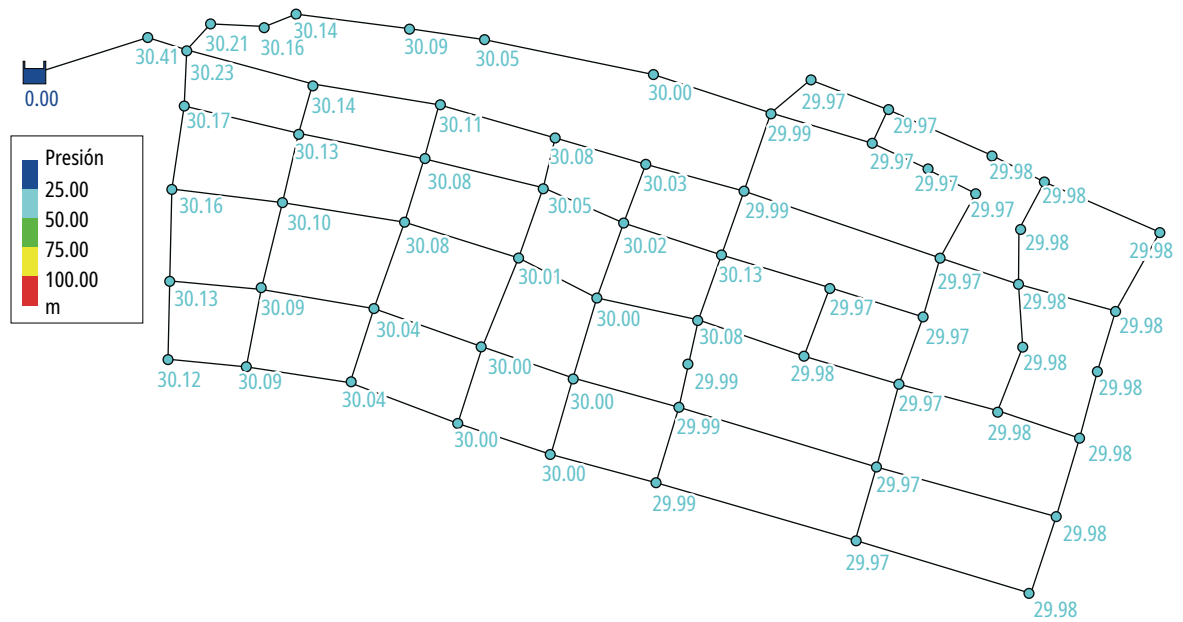
De la simulación del escenario (Figura 6 y Figura 7) actual se identifica que hay tramos con velocidades muy bajas y estancamiento en la parte norte del municipio (situación inconveniente en sistemas de distribución), razón por la cual, en el escenario proyectado, se contempló la construcción de un segundo tanque elevado localizado en el centro del municipio (Figura 8 y Figura 9), intervención

que mejora sustancialmente el comportamiento hidráulico en términos de velocidades (variando entre 0.2 y 2 m/s) y presiones (variando entre 34 mca y 40 mca). Cabe aclarar que se requiere de un segundo bombeo y un tanque de succión para suministrar el agua al nuevo tanque, bombeo no tan crítico, pues el municipio ya cuenta con energía eléctrica.



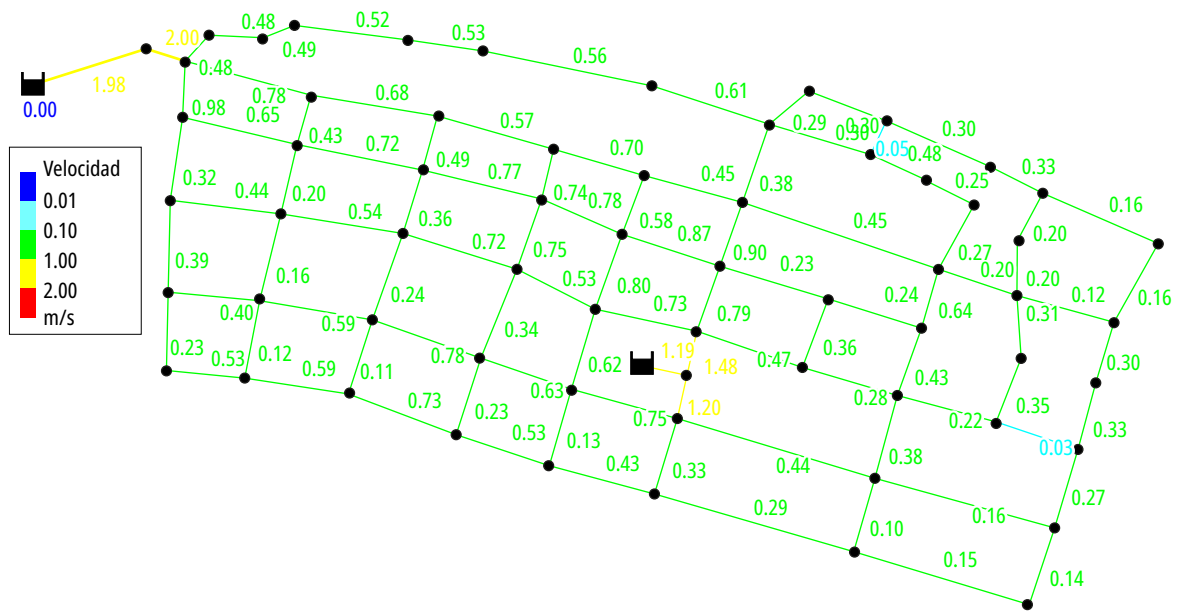
**Figura 6.** Modelación de velocidades en la red de distribución para el escenario actual

Fuente: elaboración propia en software de diseño EPANET [26].



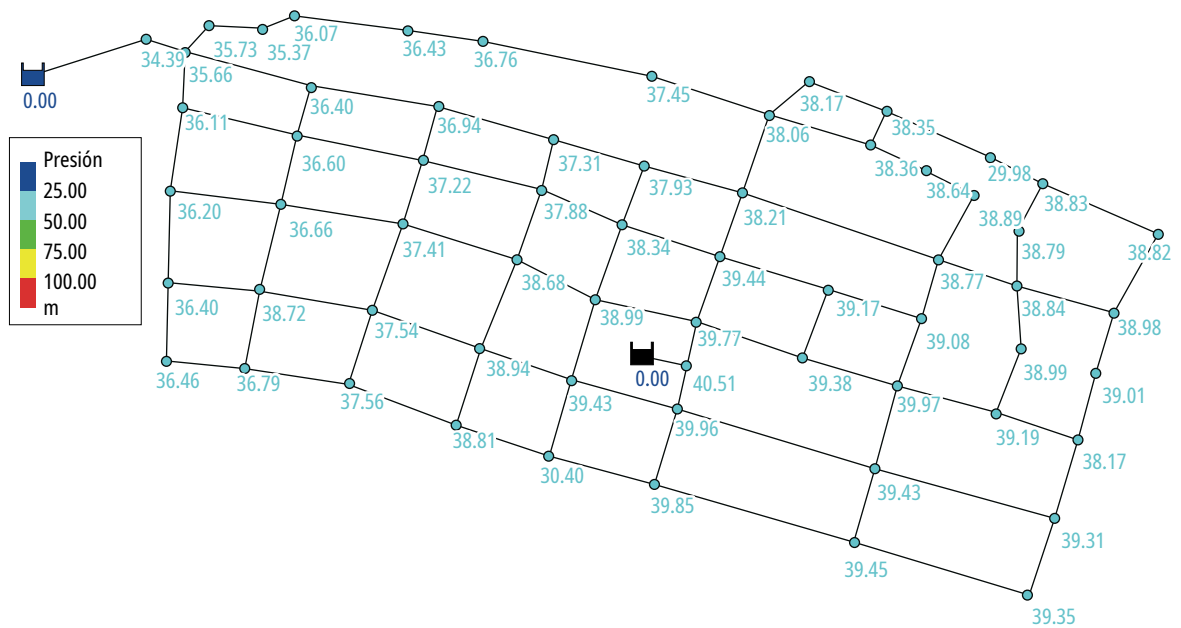
**Figura 7.** Modelación de presiones en la red de distribución para el escenario actual

Fuente: elaboración propia en software de diseño EPANET [26].



**Figura 8.** Modelación de velocidades en la red de distribución para el escenario proyectado

Fuente: elaboración propia en software de diseño EPANET [26].



**Figura 9.** Modelación de presiones en la red de distribución para el escenario proyectado

Fuente: elaboración propia en software de diseño EPANET [26].

## Discusión

Por un lado, de la Figura 5 se puede observar que el modelo propuesto por el método de Wappaus es el que mejor se ajusta a los cuatro puntos correspondientes a los censos del DANE. En segundo lugar, se tiene el método geométrico. En el caso de los modelos que más divergen de los puntos del DANE, se tienen exponencial y el aritmético. Además, estos resultados muestran que hay que ser cuidadosos al momento de elegir el método para proyectar la población, aunque en el caso de este trabajo se utilizaron los datos arrojados por el promedio de los métodos acá estudiados; esta curva tendió a los valores de los métodos de Wappaus y geométrico, que se ven contrarrestados entre sí, porque mientras uno está por encima de los datos del DANE y las proyecciones, el otro está por debajo.

Por otro lado, al comparar el caudal de diseño o caudal demandado por la población ( $QMD = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}$ ) con los caudales mínimos estimados, se identifica que el río Ñagaradó puede suministrar suficiente agua cruda, incluso en el escenario más desfavorable, como es el caso del periodo de sequía o estiaje asociado a 100 años de periodo de retorno ( $Q_{Tr} = 0.136 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Además, teniendo en cuenta el concepto de caudal ambiental o ecológico, con el fin de no afectar las propiedades naturales y físico químicas del afluente Ñagaradó, se resalta que el caudal de abastecimiento para la población es de alrededor del 10 % del  $Q_{Tr} = 0.136 \text{ m}^3/\text{s}$ , por lo que no existen mayores riesgos de afectación, tanto para las especies acuáticas del afluente como para la población demandante del recurso hídrico. Adicionalmente, el análisis fisicoquímico y microbiológico del agua del punto de captación del río Ñagaradó sugiere que puede emplearse para consumo humano con el debido tratamiento y potabilización.

Por último, es importante resaltar que, para la propuesta aquí planteada se consideraron los tanques de almacenamiento y la red de distribución existente en la zona, la cual no presenta las condiciones óptimas para un sistema de acueducto por sus bajas velocidades en la zona más alejada del tanque de carga, por lo cual, se propuso el

mejoramiento o intervención de ajuste. En ese contexto, los únicos elementos nuevos que presenta el sistema son las estaciones de bombeo, la conducción desde el río Ñagaradó y el tanque de carga, los cuales luego de tener información topográfica de detalle se podrían optimizar y llevar a una etapa de diseño de detalle para construcción.

## Conclusiones

En este trabajo, se exploró el diseño de una alternativa para el suministro de agua al municipio de Vigía del Fuerte (Antioquia) desde el río Ñagaradó, pues este presenta un potencial alto en términos de cantidad y calidad para ser considerado como la fuente de abastecimiento para el acueducto de este municipio. Además, el diseño planteado puede escalarse a detalle, para su construcción con costos relativamente bajos, configurándose como una alternativa viable con un impacto positivo para el casco urbano del municipio.

Adicionalmente, el análisis preliminar presentado en este trabajo sobre la calidad del agua sugiere que el agua del río Ñagaradó puede emplearse para consumo humano con el debido tratamiento y potabilización, proceso no discutido aquí debido a que no hace parte del alcance de este trabajo. Sin embargo, no se descarta profundizar en ello en futuros trabajos, donde sería necesario tomar y analizar más muestras de agua, tomadas en momentos diferentes debido a que las condiciones de esta cambian en el tiempo, principalmente por el comportamiento del clima cuando no hay actividad urbana cerca a la fuente.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Cooperativa de Colombia por su apoyo mediante los proyectos de investigación INV2391 e INV2399; al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM por los datos suministrados; al laboratorio Acuazul Ltda., por los análisis fisicoquímicos realizados, y a la Alcaldía del municipio de Vigía del Fuerte por los planos de redes y cartográficos suministrados.

## Referencias

- [1] Naciones Unidas [UN], “Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.” 2022. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>.
- [2] H. Amorocho-Daza, S. Cabrales, R. Santos, and J. Saldaña, “A New Multi-Criteria Decision Analysis Methodology for the Selection of New Water Supply Infrastructure”, *Water*, vol. 11, n.º 4, p. 805, abril de 2019. <https://doi.org/10.3390/w11040805>
- [3] J. Colón López and C. Restrepo, “Water Quality and Socio-Economic Indicators are Linked in a Tropical Watershed: Emerging Implications for the Sustainable Management of Waterscapes”, *Wetlands*, vol. 39, n.º 6, pp. 1303–1316, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01232-0>
- [4] M. Montgomery and M. Elimelech, “Water And Sanitation in Developing Countries: Including Health in the Equation”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, n.º 1, pp. 17–24, enero de 2007. <https://doi.org/10.1021/es072435t>
- [5] L. Santos Pereira, I. Cordery, and L. Iacovides, “Coping with water scarcity”. UNESCO Biblioteca Digital. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000127846>.
- [6] M. Kumar, J. P. Deka, and O. Kumari, “Development of Water Resilience Strategies in the context of climate change, and rapid urbanization: A discussion on vulnerability mitigation”, *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 10, p. 100308, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100308>
- [7] J. Ángel, M. Ordoñez, J. Olivero, C. Echavarría, H. Ayala, y M. Cabrera, “Consideraciones sobre la minería en el departamento del Chocó y recomendaciones para mejorar la gestión”, *Geopatrimonio – Univ. Cart. - IIAP - WWF*, 2019. [https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/consideraciones\\_sobre\\_la\\_mineria\\_en\\_el\\_departamento\\_del\\_choco\\_doble\\_pagina.pdf](https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/consideraciones_sobre_la_mineria_en_el_departamento_del_choco_doble_pagina.pdf)
- [8] C. J. Botia Flechas y J. Preciado, “Resiliencia comunitaria: Defensa del agua y del territorio en la cuenca del río Sumapaz, Colombia”, *Perspect. Geográfica*, vol. 24, n.º 1, pp. 13-34, 2019. <https://doi.org/10.19053/01233769.8425>
- [9] G. Rivillas-Ospina et al., “Alternatives for Recovering the Ecosystem Services and Resilience of the Salamanca Island Natural Park, Colombia”, *Water*, vol. 12, n.º 5, p. 1513, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12051513>
- [10] O. Molina, T. T. Luong, and C. Bernhofer, “Projected Changes in the Water Budget for Eastern Colombia Due to Climate Change”, *Water*, vol. 12, n.º 1, p. 65, 2019. Disponible: <https://doi.org/10.3390/w12010065>
- [11] J. D. Correa Rendon, “Calidad del agua en humedales del plano de inundación del Río Atrato,” *Rev. Científica en Ciencias Ambient. y Sostenibilidad CAS*, vol. 11, n.º 1, pp. 93–109, 2014. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/CAA/article/view/16917/16758>
- [12] Empresa de Vivienda de Antioquia - VIVA, “Proyecto Municipal Integral Vigía del Fuerte,” 2014. [https://issuu.com/viva\\_antioquia/docs/pmi\\_vig\\_a\\_del\\_fuerte](https://issuu.com/viva_antioquia/docs/pmi_vig_a_del_fuerte).
- [13] F. M. Medina Mosquera and H. J. Ayala Mosquera, “Determinación de la contaminación mercurial en personas vinculadas con la minería de oro en el Distrito Minero del San Juan, departamento del Chocó, Colombia”, *Revista Bioetnia*, vol. 8, n.º 2, pp. 195–206, 2020. <https://doi.org/10.51641/bioetnia.v8i2.49>
- [14] V. A. Tzanakakis, N. V. Paranychianakis, and A. N. Angelakis, “Water Supply and Water Scarcity,” vol. 12, n.º 9, p. 2347, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12092347>
- [15] Departamento Administrativo de Planeación, “Anuario Estadístico de Antioquia 2018,” 2018. <https://antioquia.gov.co/images/PDF2/Planeacion/estadisticas-de-antioquia/anuario-agropecuario-antioquia-2018.pdf>.
- [16] Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres CMGRD Vigía del Fuerte, “Estrategia municipal para la respuesta a emergencias,” 2017.
- [17] IDEAM, “Promedios Climatológicos 1981 - 2010,” 2022. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/553571/Promedios+Climatologicos++1981+-+2010.xlsx/f28d0b07-1208-4a46-8ccf-bddd70fb4128>.
- [18] J. D. Ríos, F. Vélez, V. Aristizábal, J. Gómez, C. Restrepo, y S. Pérez, “Investigación formativa como soporte al desarrollo de las regiones de Antioquia: Diseño de un sistema de acueducto para Vigía del Fuerte teniendo como fuente el afluente Ñagaradó”, en *Actas de memorias II congreso internacional de ingeniería con impacto social CIISOL 2021*. Medellín: Universidad Cooperativa de Colombia, 2022, p. 25. <https://doi.org/10.16925/ecam.04>
- [19] J. I. Vélez, G. Poveda, y O. J. Mesa, *Balances Hidrológicos de Colombia, Serie del Posgrado en Recursos Hidráulicos*, No. 16. Medellín: Colciencias, 2000. [https://www.academia.edu/835883/Balances\\_Hidrol%C3%B3gicos\\_de\\_Colombia](https://www.academia.edu/835883/Balances_Hidrol%C3%B3gicos_de_Colombia)
- [20] UPME, “Proyecto de investigación: Atlas hidrológico de Colombia”, Medellín: Universidad Nacional de Colombia UNAL, 2000. <https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1224>
- [21] Ven Te Chow, Maidment, and Mays, *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, 1988.



- [22] Ministerio de la Protección Social, “Decreto Número 1575 de 2007”, 2007. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007#:~:text=El%20objeto%20del%20presente%20decreto,consumo,%20exceptuando%20el%20agua%20envasada>
- [23] Empresas Públicas de Medellín E. S. P, “Normas de diseño de sistemas de acueducto de las Empresas Públicas de Medellín E. S. P”, 2013. [https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro\\_de\\_documentos/normatividad\\_y\\_legislacion/agua/Norma\\_Diseño\\_Acueducto\\_2013.pdf](https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/normatividad_y_legislacion/agua/Norma_Diseño_Acueducto_2013.pdf)
- [24] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO B, 2 ed. Bogotá: Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico (Ed.); Universidad de los Andes, 2010. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo-b-030714.pdf>
- [25] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, Resolución 0330 - 2017. Reglamento técnico para el sector agua potable y saneamiento básico - RAS, 2017. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>
- [26] U.S. Environmental Protection Agency, EPANET. “Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems,” 2022. <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- [27] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, Resolución 2115 - 2007, 2007. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2115%20-%202007.pdf>