

**CARACTERIZACIÓN DE LAS TOMAS DE AGUA DEL SISTEMA MORNING GLORY
EN EL EMBALSE LA REGADERA**

JOEL SANTIAGO BECERRA SILVA

PAULA ANDREA VELOZA ÁNGEL

**Proyecto de investigación para optar al título de
INGENIERO QUÍMICA**

Director

DIANA CAROLINA GARZÓN VELASCO

Ingeniera Ambiental

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre

Firma del director

Nombre

Firma del Presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá D.C. junio 2023

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSÉ LUIS MACIAS RODRÍGUEZ

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Directora de programa de Ingeniería Industrial

Dra. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de grado a Ricardo Becerra y Johanna Silva, pues ellos son los que me han inculcado los valores y principios, el deseo de progresar como persona y profesional, son los que me brindaron la oportunidad de estudiar una carrera que me apasiona en una universidad que me gusta y me formó muy bien.

Dedico este logro a mis hermanos David y Alison; abuelas Gregoria y Carmen; Hermano del alma Sebastián, pues siempre han sido símbolo de superación, esfuerzo y competencia en mi vida.

Quiero dedicar este logro a mis amigos que me acompañaron durante todo mi proceso universitario hasta el fin de la carrera; a Paula mi compañera de tesis con la cual vivimos aventuras a lo largo de este trabajo de grado, a Angie, Giovanni, Pinto, Kevin, Juanma, Mateus, Langlade, Luisa y demás compañeros que me acompañaron en algún momento por esta etapa.

Joel Santiago Becerra Silva

DEDICATORIA

Este Proyecto va dedicado especialmente a mi mamá quien siempre estuvo presente con su amor y sabiduría, apoyándome en cada uno de los pasos que di para llegar hasta este punto, pues con su aliento me hizo entender que todo es posible si te lo propones y luchas por tus metas. A mis tías quienes desde pequeña me cuidaron y me formaron como la mujer que soy hoy en día, quienes estuvieron en cada uno de los momentos en los que más dificultades tenía y que con su aliento y motivación, me ayudaron a comprender los errores y a aprender de ellos.

A mi papá por creer en mí y darme su apoyo. A mis abuelas que, aunque ya no están presentes, estarían orgullosas y quienes siempre me han cuidado en cada momento.

A mis amigas y amigos que me han acompañado durante este largo trayecto, por brindarme una amistad incondicional y fiel, apoyándome y alentándome en cada adversidad que se me presentaba, a mi novio quien nunca dejó de creer en mí y principalmente a mi compañero de tesis Santiago Becerra, con quien compartí este largo camino de múltiples emociones, por siempre ir de mi mano en cada objetivo, por nunca desistir y darme el aliento que necesitaba para culminar este proyecto, por la paciencia y en especial por confiar en mí.

A los ingenieros y operadores de la planta El Dorado del acueducto, quienes nos ofrecieron su ayuda y creyeron en nuestros conocimientos con el fin de lograr cada una de las metas propuestas, ya que sin ellos no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Paula Andrea Veloza Ángel

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, por brindar apoyo a nosotros, por brindar conocimiento, por facilitar un proyecto como este mediante consejos, orientaciones, experiencia, el uso del laboratorio, la toma de las muestras, brindar datos y dotarnos de valores y habilidades para el mundo laboral. Específicamente quiero agradecer al ingeniero Marco Millán, ingeniera Nancy Aldana, ingeniero Hernando Espitia, Laura Osorio y todo el personal de Planta El Dorado que siempre estuvo dispuesto a enseñarnos y colaborarnos.

Quiero agradecer a la Universidad de América por poner profesionales en mi camino que se dedican a compartir el conocimiento y ayudar a evolucionar personal y profesionalmente a cada uno de sus estudiantes.

Finalmente quiero agradecer a nuestra directora de proyecto Diana Garzón por mostrar mucho interés en nuestro proyecto, orientarnos y ayudarnos a sacar este proyecto adelante para culminar nuestras carreras como Ingenieros Químicos de la Universidad de América.

Joel Santiago Becerra Silva

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros padres, quienes nos han apoyado durante todo este recorrido, nos han alentado y nos han brindado la sabiduría para continuar fortaleciéndonos como personas y futuros ingenieros, pues con su compañía, nos regalaban la fuerza para nunca desistir y seguir creyendo en nosotros, por el amor y el trabajo que han realizado, ya que, sin ellos, esto no hubiera sido posible.

Agradezco también a mis amigas, Luisa, Valentina, Camila, Erika, quienes estuvieron desde inicio de la carrera y con quienes compartí experiencias que hoy me hacen ser una mejor persona, les agradezco por siempre estar presente en mi vida y por brindarme un apoyo incondicional. De igual forma agradezco a quienes se convirtieron en una familia, Mateo, Ana, Felipe, Cristian, por siempre creer en mí, por nunca dejar de apoyarme y por todo el amor que me ayudó a resistir cada una de las adversidades.

Paula Andrea Veloza Ángel

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| RESUMEN | 15 |
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| OBJETIVOS | 19 |
| 1. POTABILIZACIÓN | 20 |
| 1.1 Potabilización | 20 |
| <i>1.1.1 Etapas del proceso de potabilización</i> | 20 |
| 1.2 Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (E.A.A.B) | 21 |
| 1.3 Calidad del agua | 21 |
| 1.4 Parámetros de calidad del agua para consumo humano | 21 |
| 2. METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA | 25 |
| 2.1 Parámetros físicos | 25 |
| <i>2.1.1 Conductividad eléctrica</i> | 25 |
| <i>2.1.2 Turbiedad</i> | 26 |
| <i>2.1.3 Color</i> | 27 |
| 2.2 Parámetros químicos | 28 |
| <i>2.2.1 Ph</i> | 28 |
| <i>2.2.2 Alcalinidad</i> | 29 |
| <i>2.2.3 Dureza</i> | 30 |
| <i>2.2.4 Cloruros</i> | 31 |
| <i>2.2.5 Nitritos técnica colorimétrica</i> | 32 |
| <i>2.2.6 Sulfatos técnica nefelométrica</i> | 32 |
| <i>2.2.7 Hierro</i> | 32 |
| <i>2.2.8 Manganeso</i> | 33 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.2.9 | <i>Amonio</i> | 34 |
| 2.3 | Parámetros microbiológicos | 34 |
| 3. | RESULTADOS Y ANÁLISIS | 36 |
| 3.1 | Caracterización y análisis de las aguas del embalse junto a factores hidroclimatológicos y meteorológicos | 40 |
| 3.2 | Comportamiento de los vientos | 85 |
| 4. | ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO | 91 |
| 4.1 | Remoción de hierro y manganeso | 91 |
| 4.1.1 | <i>Procesos de oxidación, precipitación y filtración</i> | 92 |
| 4.1.2 | <i>Procesos de ablandamiento por zeolita/ intercambio iónico</i> | 95 |
| 4.1.3 | <i>Procesos de separación por medios filtrantes</i> | 95 |
| 4.1.4 | <i>Electrocoagulación</i> | 96 |
| 4.1.5 | <i>Aireación</i> | 96 |
| 4.2 | Remoción de amonio | 97 |
| 4.2.1 | <i>Tecnologías fisicoquímicas</i> | 99 |
| 5. | CONCLUSIONES | 104 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 106 |
| | ANEXOS | 112 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1 <i>Etapas del proceso de potabilización</i> | 20 |
| Figura 2 <i>Conductímetro</i> | 26 |
| Figura 3 <i>Turbidímetro</i> | 27 |
| Figura 4 <i>Espectrofotómetro</i> | 28 |
| Figura 5 <i>pHmetro</i> | 29 |
| Figura 6 <i>Titrande</i> | 30 |
| Figura 7 <i>Equipo de absorción atómica</i> | 33 |
| Figura 8 <i>Ammonium Test</i> | 34 |
| Figura 9 <i>Sistema Morning Glory del embalse la regadera</i> | 36 |
| Figura 10 <i>Lluvias 20/04/2022</i> | 41 |
| Figura 11 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 20/04/2022</i> | 42 |
| Figura 12 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 20/04/2022</i> | 43 |
| Figura 13 <i>pH en la muestra tomada el 20/04/2022</i> | 44 |
| Figura 14 <i>Lluvias 28/04/2022</i> | 45 |
| Figura 15 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 28/04/2022</i> | 45 |
| Figura 16 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 28/04/2022</i> | 46 |
| Figura 17 <i>pH en la muestra tomada el 28/04/2022</i> | 47 |
| Figura 18 <i>Lluvias 3/05/2022</i> | 48 |
| Figura 19 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 3/05/2022</i> | 48 |
| Figura 20 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 3/05/2022</i> | 49 |
| Figura 21 <i>pH en la muestra tomada el 3/05/2022</i> | 50 |
| Figura 22 <i>Lluvias 10/05/2022</i> | 51 |
| Figura 23 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 10/05/2022</i> | 51 |
| Figura 24 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 10/05/2022</i> | 52 |
| Figura 25 <i>pH en la muestra tomada el 10/05/2022</i> | 53 |
| Figura 26 <i>Lluvias 17/05/2022</i> | 54 |
| Figura 27 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 17/05/2022</i> | 54 |
| Figura 28 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 17/05/2022</i> | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 <i>pH en la muestra tomada el 17/05/2022</i> | 56 |
| Figura 30 <i>Lluvias 11/08/2022</i> | 57 |
| Figura 31 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 11/08/2022</i> | 57 |
| Figura 32 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 11/08/2022</i> | 58 |
| Figura 33 <i>pH en la muestra tomada el 11/08/2022</i> | 59 |
| Figura 34 <i>Lluvias 4/01/2023</i> | 60 |
| Figura 35 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 4/01/2023</i> | 60 |
| Figura 36 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 4/01/2023</i> | 61 |
| Figura 37 <i>pH en la muestra tomada el 4/01/2023</i> | 62 |
| Figura 38 <i>Lluvias 13/01/2023</i> | 63 |
| Figura 39 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 13/01/2023</i> | 63 |
| Figura 40 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 13/01/2023</i> | 64 |
| Figura 41 <i>pH en la muestra tomada el 13/01/2023</i> | 65 |
| Figura 42 <i>Lluvias 18/01/2023</i> | 65 |
| Figura 43 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 18/01/2023</i> | 66 |
| Figura 44 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 18/01/2023</i> | 67 |
| Figura 45 <i>pH en la muestra tomada el 18/01/2023</i> | 68 |
| Figura 46 <i>Lluvias 9/02/2023</i> | 69 |
| Figura 47 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 9/02/2023</i> | 69 |
| Figura 48 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 9/02/2023</i> | 70 |
| Figura 49 <i>pH en la muestra tomada el 9/02/2023</i> | 71 |
| Figura 50 <i>Lluvias 23/02/2023</i> | 71 |
| Figura 51 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 23/02/2023</i> | 72 |
| Figura 52 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 23/02/2023</i> | 73 |
| Figura 53 <i>pH en la muestra tomada el 23/02/2023</i> | 74 |
| Figura 54 <i>Lluvias 28/02/2023</i> | 75 |
| Figura 55 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 28/02/2023</i> | 75 |
| Figura 56 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 28/02/2023</i> | 76 |
| Figura 57 <i>pH en la muestra tomada el 28/02/2023</i> | 77 |
| Figura 58 <i>Lluvias 16/03/2023</i> | 78 |
| Figura 59 <i>Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 16/03/2023</i> | 78 |

| | |
|--|-----|
| Figura 60 <i>Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 16/03/2023</i> | 79 |
| Figura 61 <i>pH en la muestra tomada el 16/03/2023</i> | 80 |
| Figura 62 <i>Lluvias desde abril 2022 hasta marzo 2023</i> | 81 |
| Figura 63 <i>Turbiedad presentada entre 20/04/2022 a 16/03/2023</i> | 82 |
| Figura 64 <i>Color aparente presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023</i> | 82 |
| Figura 65 <i>pH presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023</i> | 83 |
| Figura 66 <i>Hierro presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023</i> | 83 |
| Figura 67 <i>Manganeso presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023</i> | 84 |
| Figura 68 <i>Amonio presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023</i> | 84 |
| Figura 69 <i>Estructura de un Separador de columna empacada</i> | 100 |
| Figura 70 <i>Evolución del cloro residual en la cloración de agua natural</i> | 101 |
| Figura 71 <i>Esquema de un proceso de oxidación electroquímica</i> | 102 |
| Figura 72 <i>Métodos de remoción de amonio</i> | 103 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1 <i>Normatividad de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos</i> | 23 |
| Tabla 2 <i>Normatividad de parámetros fisicoquímicos</i> | 24 |
| Tabla 3 <i>Muestreos realizados y parámetros vinculados</i> | 38 |
| Tabla 4 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 20/04/2022</i> | 85 |
| Tabla 5 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 28/04/2022</i> | 86 |
| Tabla 6 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 17/05/2022</i> | 86 |
| Tabla 7 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 11/08/2023</i> | 87 |
| Tabla 8 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 04/01/2023</i> | 87 |
| Tabla 9 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 13/01/2023</i> | 88 |
| Tabla 10 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 18/01/2023</i> | 88 |
| Tabla 11 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 09/02/2023</i> | 89 |
| Tabla 12 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 23/02/2023</i> | 89 |
| Tabla 13 <i>Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 16/03/2023</i> | 90 |
| Tabla 14 <i>Porcentaje de concentración de ion amonio y amoniaco en función del ph</i> | 98 |

RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad realizar la caracterización del agua contenida en el embalse La Regadera haciendo uso del sistema Morning Glory. La necesidad de caracterizar el recurso hídrico surge por una emergencia presentada en noviembre del 2020, el agua que llegaba para ser potabilizada presentaba elevados niveles de turbiedad, color aparente, contenido de hierro, contenido de manganeso y contenido de amonio, mediante la caracterización de la materia prima se busca tener más información sobre el agua contenida del embalse y el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos.

Lo anterior se realizó por medio de la toma muestras de las diferentes válvulas situadas a distintas profundidades del embalse, determinando sus características (turbidez, color aparente, pH, amonio, hierro y manganeso), por medio de diferentes técnicas de análisis fisicoquímicos, de igual forma se analizaron los factores que influyen en la calidad del agua contenida en el embalse tales como la precipitación y el movimiento que se podría generar en las aguas de la represa ocasionado por las velocidades y dirección del viento.

Adicional se realizó una revisión bibliográfica con el fin de brindar alternativas de tratamiento a diferentes concentraciones de hierro, manganeso y amonio, y de esta manera brindar la información que pueda ser útil y se pueda contemplar para la implementación en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) en caso de requerirlo.

En base a la caracterización de cada una de las muestras realizadas de las diferentes tomas de agua, se evidencia en algunos casos la homogenización en las aguas del embalse, y en otros casos se denotan diferencias entre las aguas obtenidas a distintas profundidades de la represa. De igual forma el análisis de las precipitaciones como factor determinó que estas no afectan directamente al embalse, pero estas afectan los afluentes de la represa, ya sea por el aumento de caudal de los ríos que desembocan allí. Por otro lado, el análisis de los datos de dirección y velocidad del viento determinaron que la velocidad máxima registrada entre abril del 2022 hasta marzo del 2023 fue de 11,3 Km/h.

INTRODUCCIÓN

El Acueducto de Bogotá realiza la gestión integral del recurso hídrico gracias al Sistema de Acueducto, que está formado por varios componentes que cumplen cada uno una función en la captación, transporte, tratamiento, almacenamiento y distribución del agua. El proceso inicia desde la captación de las fuentes de agua y luego pasa a las líneas de aducción o transporte del agua cruda, posteriormente es dirigida a los embalses donde se almacena el agua cruda, seguido va a las plantas de tratamiento, una vez el agua ha sido potabilizada es enviada hasta los tanques de almacenamiento y compensación, por último, es distribuida a las estaciones de bombeo para garantizar el suministro de agua potable. El producto tiene como destino las viviendas, industrias e instituciones de Bogotá, además de municipios como: La Calera, Chía, Cajicá, Tocancipá, Gachancipá, Sopó, Cota, Funza, Madrid, Mosquera y Soacha. Con este sistema se garantiza la seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad técnica, eficiencia de operación y sostenibilidad de los sistemas de acueducto [1].

Los sistemas de abastecimiento están compuestos de: sistemas de captación (cuencas hidrográficas, ríos y quebradas), sistemas de distribución (túneles y tuberías), sistemas de almacenamiento (embalses) y producción (plantas de tratamiento) [2].

Es así como la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá es propietaria de una extensión total de 34.076 hectáreas administradas técnica y operativamente por la Dirección de Abastecimiento; de las cuales 3.323 hectáreas aproximadamente se disponen en el Sistema Sumapaz (cuenca alta del río Tunjuelo), sistema que incluye: Laguna de Los Tunjos, embalses de Chisacá y Regadera, planta de tratamiento El Dorado y La Laguna [3].

Al embalse La Regadera llega el río Tunjuelo, conformado por los ríos Chisacá y Curubital, tiene un volumen útil de $3,7 \text{ hm}^3$. Del embalse La Regadera se abastecen las plantas de tratamiento La Laguna y El Dorado [4].

El principal componente del Sistema Tunjuelo es la Planta de Tratamiento de Agua Potable “El Dorado”, ubicada al sur oriente de Bogotá y puesta en operación en abril de 2001. Con una capacidad de almacenamiento de 10.400 m^3 , El Dorado capta el agua cruda del sistema Tunjuelo, compuesto por el embalse de Chisacá y por el embalse de La Regadera. La planta tiene una capacidad máxima de tratamiento de $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$, aunque actualmente trata $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$ con el fin de tener la capacidad de respuesta en caso de requerir más agua potabilizada. Cuenta con un sistema

de tratamiento convencional compuesto por un rebose de entrada, una canaleta Parshhall, cuatro grupos de floculadores-sedimentadores, doce filtros con lavado aire agua, sedimentadores de alta tasa en acero inoxidable, un tanque de agua tratada de 3.000 m³ y un sistema de supervisión y control para todo el proceso de tratamiento [5].

El embalse la Regadera tiene 27 metros de altura, cuenta con cinco tomas de agua a diversos niveles. Teniendo en cuenta los eventos ocurridos en el embalse la Regadera durante noviembre de 2020, el personal operativo de la planta manifestó que la calidad del agua cruda en los diversos niveles del embalse presentó medidas nunca antes vistas, y algunas variables que antes no habían sido problema para el tratamiento, afectaron de tal manera, que se recurrió a la adición de nuevos productos químicos al proceso de tratamiento. Debido a la emergencia presentada, se considera necesario determinar las mejores opciones de tratamiento para las calidades de agua presentadas en los diferentes niveles del embalse.

Durante las visitas técnicas realizadas tanto a la planta de tratamiento como al embalse, se evidenció que la captación del agua se realizaba mediante la válvula 1 (toma alta) y un poco de la válvula 2. Adicionalmente por un problema presentado en el bypass de la válvula de fondo, esta no se encontraba operable, por lo cual, no se podía realizar movimientos de agua para cambiar y mejorar la calidad del recurso almacenado; con esto, la calidad del agua captada por las válvulas 3, 4 y 5, siendo las más profundas; presentaba unas características fisicoquímicas muy diferentes a las que se están tratando actualmente y las que normalmente se tratan, necesitando alternativas a las combinaciones de productos químicos que se puedan implementar, definiendo la tratabilidad requerida para las bajas calidades de agua, como las que se presentan entre las válvulas 3, 4 y 5 del embalse la Regadera.

Dar solución a estas necesidades representa un gran aporte a la empresa de Acueducto de Bogotá, específicamente al funcionamiento de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) El Dorado, brindando información importante para la operación de la misma, pues mediante la caracterización de las aguas en cada una de las tomas, brindará información a los funcionarios de la planta acerca de la calidad del agua que podría llegar a la planta según la válvula que se abra en el embalse para la captación; los operarios de la planta ha manifestado que el hecho de conocer en qué condiciones se encuentra el agua cruda almacenada, les permite “prepararse” en cuanto a selección de insumos y dosificación para la tratabilidad requerida, de esta manera, evitando algún percance asociado a

este factor, que puede causar el parón de la planta afectando a todo el sector al cual abastece este sistema.

OBJETIVOS

Objetivo general

Caracterizar el agua contenida en el embalse La Regadera haciendo uso del sistema Morning Glory, brindando alternativas de insumos al proceso realizado en la PTAP El Dorado.

Objetivos específicos

- Determinar las características del agua proveniente del embalse La Regadera.
- Analizar los factores que influyen en la calidad del agua que sale por cada una de las tomas en el Morning Glory.
- Proponer alternativas de insumos para el proceso de potabilización de agua.

1. POTABILIZACIÓN

Por consiguiente, este capítulo es una guía en donde se hace énfasis a ciertos aspectos importantes, con el fin de abarcar con todos los temas relacionados con la potabilización, sus etapas, conocer sobre la empresa Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, parámetros que se tienen en cuenta en la calidad de agua

1.1 Potabilización

La potabilización es el conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, para modificar sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas con el propósito de hacerla apta para consumo humano, estos procesos están determinados por el origen del agua ya sea superficial o subterránea, la calidad inicial y las limitaciones impuestas para su uso final, de acuerdo con una norma dada [8].

1.1.1 Etapas del proceso de potabilización

Para el agua superficial los procesos convencionales son:

Figura 1

Etapas del proceso de potabilización

| Proceso convencional | Descripción del proceso |
|----------------------|---|
| Mezcla rápida | Disociación de diferentes sustancias químicas como coagulantes y gases; los cual se puede efectuar mediante turbulencia, siendo provocada por medios hidráulicos o Mecánicos. |
| Floculación | Agitación lenta prolongada durante la cual las partículas se aglomeran, aumentando su tamaño y adquiriendo mayor densidad. |
| Sedimentación | Eliminación de los flóculos formados en el proceso anterior. |
| Filtración | Eliminación del material suspendido, el cual está compuesto por flóculo, suelo, metales oxidados y microorganismos. |

| | |
|---------------------|---|
| Desinfección | Suministro de cloro y materiales químicos para eliminar organismos patógenos garantizando una concentración residual de desinfectante en el sistema de distribución |
|---------------------|---|

Nota. Etapas del proceso de potabilización. Tomado de: Gualí, e. a. (2016). Evaluación de la calidad del agua en la planta. Bogotá, Colombia: universidad distrital francisco José de caldas [9].

1.2 Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (E.A.A.B)

La empresa pública de acueducto y alcantarillado de Bogotá, prestadora de los servicios de acueducto, alcantarillado sanitario y pluvial, tiene como misión la responsabilidad de gestionar de forma integral el recurso hídrico y el saneamiento básico como elementos comunes de vida y derechos humanos fundamentales, generando bienestar y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental del territorio. Inicia con la captación de las fuentes de agua superficial utilizadas en los diferentes sistemas de abastecimiento, pasando posteriormente por los sistemas de almacenamiento y distribución, con el fin de garantizar el suministro de este recurso a viviendas, industrias e instituciones existentes en el entorno civil de la capital. Agregado Norte, Chingaza y Tunjuelo, son los tres sistemas de embalses que surten de agua a la capital y municipios vecinos, los cuales cuentan con las plantas de tratamiento Francisco Wiesner, Yomasa, El Dorado, Vitelma, Tibitoc y La Laguna [10].

1.3 Calidad del agua

La calidad del agua puede ser entendida desde dos perspectivas diferentes: su función como recurso y su impacto en el ambiente. En cuanto a su función, la calidad se refiere a la habilidad inherente del agua para satisfacer diversos usos humanos. Por otro lado, desde la perspectiva ambiental, se trata de las condiciones que deben prevalecer en el agua para mantener un ecosistema equilibrado y cumplir con objetivos específicos de calidad. Asimismo, la calidad del agua se relaciona con sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas en su estado natural o después de haber sido afectada por actividades humanas [11].

1.4 Parámetros de calidad del agua para consumo humano

Los índices de calidad del agua surgen como una herramienta para la evaluación del recurso hídrico, determinados por una serie de parámetros físicos, químicos y microbiológicos con relación a estándares de calidad, con el fin de ser caracterizada como apta o no para el consumo humano.

Son evaluados por medio de ensayos estandarizados los componentes y propiedades presentes en este recurso para que de esta forma se pueda establecer su grado de potabilidad o establecer propiedades específicas para el tratamiento, transporte y almacenamiento del agua [12].

La normativa internacional está reglamentada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la cual proporciona y gestiona las directrices relativas a la calidad del agua y la salud de las personas en forma de guías basadas en reglamentos y normas de países de todo el mundo, en desarrollo y desarrollados, promoviendo la protección de la salud pública, a partir de la adopción de modelos de gestión preventiva de los riesgos desde la captación hasta el consumidor. Estas guías están orientadas a parámetros químicos, físicos, microbiológicos y, a la vigilancia y control del agua suministrada [13].

El presente trabajo de investigación se verá enmarcado en las siguientes normas relacionadas con el agua potable a nivel nacional. El decreto 1575 de 2007, establece el sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para consumo humano, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada. Específicamente, se trabajará bajo el Artículo 3°.

El artículo tiene por objetivo presentar las características del agua para consumo humano, específicamente, características físicas, químicas y microbiológicas, que pueden afectar directa o indirectamente la salud humana; así como las pautas y valores máximos aceptables que debe cumplir el agua para el consumo humano. [14] La importancia del artículo anteriormente nombrado radica en la importancia de la utilización de plantas de tratamiento de agua como mecanismo para garantizar el acceso de agua potable a la población, de igual manera al dar cumplimiento a este se asegura el uso recomendado de los valores máximos permisibles para parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

La resolución 2115 de 2007, señala las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancias para la calidad del agua para consumo humano. El capítulo II de esta resolución establece las características físicas y químicas del agua para consumo de la población, Específicamente, se trabajará bajo el Artículo 2°. La importancia del artículo anteriormente mencionado radica en la relevancia de establecer los parámetros o valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación.

Tabla 1*Normatividad de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos*

| Parámetro | Resolución 2115 de 2007 | Parámetro | Resolución 2115 de 2007 |
|---|------------------------------------|---|------------------------------------|
| Turbiedad, UNT | 2 | Libre | 0,3 – 2 |
| Color aparente, UPC | 15 | Cloro residual, Cl ₂ | Total - |
| Conductividad, μS/cm | 1000 | Combinado | - |
| pH | 6,5 – 9 | Oxígeno disuelto | - |
| Alcalinidad, CaCO₃ | 200 | Nitritos, NO ₂ ⁻ | 0,1 |
| Cloruros, Cl⁻ | 250 | Nitratos, NO ₃ ⁻ | 10 |
| Dureza total, CaCO₃ | 300 | Sulfatos, SO ₄ ²⁻ | 250 |
| Hierro total, Fe | 0,3 | Coliformes totales, UFC/100 cm ³ | 0 |
| Aluminio residual, Al³⁺ | 0,2 | <i>E. Coli</i> , UFC/100 cm ³ | 0 |

Nota. Todos los valores están expresados en mg/L a excepción de aquellos que indiquen lo contrario. Normatividad de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Tomado de: Protección Social, M., & Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, M. (2007). Resolución 2115 de 2007. *Diario Oficial No. 46679 de 4 julio de 2007, 1, 23.*

La norma técnica de servicio NS-067 de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (E.A.A.B.), regida en las plantas potabilizadoras de la empresa, establecen los parámetros o requisitos fisicoquímicos con relación a la calidad del agua y que deben ser cumplidos a la salida de las plantas de tratamiento [15]. La importancia de la norma técnica mencionada anteriormente radica en que, al dar cumplimiento a esta, se puede garantizar la evaluación de los diferentes parámetros y requisitos fisicoquímicos en la calidad del agua establecidos por la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá.

Tabla 2

Normatividad de parámetros fisicoquímicos

| Parámetro | Unidad | Mínimo | Máximo |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Turbiedad | UNT | - | 0,75 |
| Color Aparente | UPC | - | 10 |
| pH | Unidades | 6,5 | 7,8 |
| Alcalinidad | mg/L | - | 12 |
| Cloro residual libre | mg/L | 0,7 | 2 |

Nota. Normatividad de parámetros fisicoquímicos. Tomado de: Parámetros de calidad de agua potable a la salida de las plantas de tratamiento en la EAAB-ESP, código NS-067. Disponible en: <https://www.acueducto.com.co/webdomino/sistec/consultas.nsf>.

2. METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

En este capítulo se explica cuáles son los distintos parámetros físicos, químicos y microbiológicos, que se evalúan en la PTAP El Dorado para la caracterización y monitoreo del agua, así mismo se busca explicar la metodología empleada para la realización de cada una de estas técnicas de laboratorio.

2.1 Parámetros físicos

Los parámetros físicos que generalmente son evaluados son denominados como organolépticos, ya que dan a conocer por medio de la percepción del consumidor características como el color, olor y sabor, y tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua de una manera general [16].

2.1.1 Conductividad eléctrica

Mediante esta propiedad, se puede determinar la capacidad que tiene el agua para conducir una corriente eléctrica, esto está dado por los iones presentes en el agua y también la temperatura a la cual se hace la medición; por lo tanto, si se realiza un cambio en los iones disueltos o la temperatura de medición, el valor obtenido varía. Los compuestos que forman moléculas acuosas son los que brindan mayor conductividad al medio, estos provienen de las sales o los ácidos contenidos en la fuente hídrica.

El instrumento que más se utiliza para la medición de dicha propiedad es el conductímetro y este brinda un valor con unidades en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). El proceso de medición consiste en servir la muestra, prender el conductímetro, introducir el electrodo en la muestra, esperar que el valor que aparece en la pantalla se estabilice.

Figura 2

Conductímetro



Nota. En la figura se muestra el conductímetro.

2.1.2 Turbiedad

La turbiedad se define como la medida de la transparencia en el agua al absorber o reflejar la luz. La turbiedad se presenta debido a la presencia de minerales, partículas disueltas, partículas suspendidas, materia orgánica y materia inorgánica.

Los valores de turbidez nos indican el grado de potabilidad del agua, el tratamiento requerido para su purificación, la tasa y la efectividad de procesos adjuntos a la potabilización como lo son la filtración, coagulación y sedimentación, entre otros y es uno de los parámetros más importantes en la producción de bebidas para el consumo humano debido a la claridad y apariencia de un producto aceptable.

La turbidez se determina por el método del nefelómetro, el cual consiste en la medición de la turbiedad mediante un nefelómetro o turbidímetro y los resultados se expresan en unidades de turbidez nefelométrica (UTN), su objetivo es comparar la intensidad de luz dispersada por la muestra con la intensidad de luz dispersada por una suspensión estándar de referencia en las

mismas condiciones de medida. Cuanto mayor sea la intensidad de luz dispersada, mayor será la turbiedad [17].

El proceso de medición consiste en primeramente tener calibrado el equipo haciendo uso de los patrones estandarizados para tal función, luego se procede a depositar la muestra a analizar en la celda de medición, al ponerla en el turbidímetro, mediante un haz de luz el equipo hace dicha medición y brinda el valor de turbiedad presente en la muestra.

Figura 3

Turbidímetro



Nota. En la figura se muestra el instrumento con el cual se mide la turbiedad.

2.1.3 Color

El color del agua puede deberse a la presencia de iones metálicos naturales como hierro y manganeso, humus y materiales de turba, plancton, malas hierbas y desechos industriales [17]. La medición de este parámetro se realiza comúnmente con un espectrofotómetro, en el cual se coloca un blanco (agua destilada) y así medir la muestra en referencia a dicho patrón.

Figura 4

Espectrofotómetro



Nota. En la figura se muestra un espectrofotómetro con el cual se mide el color.

2.2 Parámetros químicos

Los parámetros químicos más relevantes son aquellos que pueden incidir en la salud del consumidor, estos análisis químicos constituyen principalmente sobre los requisitos para la caracterización del agua. Existen contaminantes químicos, que generan especial angustia ya que tienen propiedades tóxicas acumulativas, entre ellos están los metales pesados y sustancias carcinógenas. De igual forma es importante tener en cuenta que la utilización de desinfectantes químicos para el tratamiento de aguas produce la formación de productos químicos secundarios [18].

2.2.1 *Ph*

La medición del potencial de hidrógeno se usa comúnmente para clasificar una sustancia, la escala está dada de 0 a 14; donde, el pH es menor a 7 se le asigna un carácter ácido a la sustancia, si el pH es igual a 7 corresponde a un pH neutro y si el pH medido es mayor a 7 corresponde a un carácter básico.

Existen diversas maneras de medir el pH, comúnmente se hace colorimétricamente o mediante un potenciómetro, también conocido como pHmetro que emplea un electrodo para realizar la medición.

Para el proceso de medición, primeramente, verificar la calibración del equipo mediante sustancias tipo buffer con pH estandarizado, se procede debe lavar el electrodo con agua destilada, luego se pone dentro de la mezcla para realizar la medición, para tener un valor más acertado, la muestra debe ser agitada.

Figura 5

pHmetro



Nota. En la figura se muestra un pHmetro con el cual se mide el pH.

2.2.2 Alcalinidad

La alcalinidad del agua es su capacidad de neutralizar ácidos, y es la suma de todas las bases titulables; el valor medido puede variar significativamente con el pH de punto final empleado. Debido a que la alcalinidad de muchas aguas superficiales es primariamente una función del contenido de carbonato, bicarbonato e hidróxido, se toma como un indicador de la concentración de estos constituyentes [19].

La alcalinidad de una muestra se determina mediante el volumen de un ácido estándar requerido para titular una porción a un pH seleccionado. La titulación se efectúa a temperatura ambiente con un pH metro o un titulador automático calibrados, o mediante indicadores coloreados. En este último caso, se debe preparar y titular un blanco del indicador [20].

Para hacer la medición de esta propiedad, se emplea un titrante. Después de haber calibrado el electrodo de pH se procede con los siguientes pasos: Verificar que exista cantidad suficiente de titulante H_2SO_4 al 0,02 N ubicada en las unidades intercambiables. Conectar el electrodo de pH (con el orificio de entrada de la solución electrolítica abierto). Colocar el electrodo y la punta de dosificación de la unidad intercambiable en el soporte de la estación del cambiador de muestras,

previamente enjuagados con suficiente agua destilada. Ubicar en la raqueta del cambiador las muestras a analizar. En el Tiamo en el ambiente puesto de trabajo, se selecciona en cargar el método llamado "Alcalinidad pH y temperatura" y se le da cargar, verificar que las muestras del cambiador de muestras estén en el orden del método cargado. Pulsar Start para iniciar el análisis de las muestras. Al finalizar las titulaciones retire del soporte de la estación del cambiador de muestras la punta de dosificación de la unidad intercambiable y el electrodo, verificando que el electrodo quede tapado.

Figura 6

Titrandos



Nota. En la figura se muestra un Titrandos con el cual se mide la alcalinidad.

2.2.3 Dureza

La dureza es una característica del agua que provoca la presencia de calcio y magnesio, que son abundantes en la corteza terrestre. El agua dura no tiene efecto negativo sobre la salud, pero reacciona con el jabón para formar un precipitado blanco (residuos jabonosos), y forma sedimentos en calentadores de agua, intercambiadores de calor, válvulas de calentadores y tuberías, a los que obstruye y reduce su eficacia [20].

Para realizar la medición de la dureza se emplea el Titrand, para ello: Coloque la unidad intercambiable que contiene EDTA 0,01M en el equipo. Colocar el electrodo y la punta de dosificación de la unidad intercambiable en el soporte de la estación del cambiador de muestras, previamente enjuagados con suficiente agua destilada. Ubicar en la raqueta del cambiador las muestras a analizar. En el Tiamo en el ambiente puesto de trabajo, se selecciona en cargar el método llamado "Dureza" y se le da cargar, verificar que las muestras del cambiador de muestras estén en el orden del método cargado. Pulsar Start para iniciar el análisis de las muestras. Al finalizar las titulaciones retire del soporte de la estación del cambiador de muestras la punta de dosificación de la unidad intercambiable y el electrodo, verificando que el electrodo quede tapado. El equipo utilizado es el mismo Titrand mostrado en la **Figura 6**

2.2.4 Cloruros

Los cloruros son sales que resultan de la combinación del gas cloro (ion negativo) con un metal (ion positivo). El cloro (Cl_2) es altamente tóxico y es usualmente utilizado como desinfectante, sin embargo, en combinación con un metal, como el sodio (Na), es esencial para la vida, dado que, pequeñas cantidades de cloruros son requeridas para la función celular en los seres vivos. En la naturaleza las sales de cloruro de sodio, cloruro de potasio, y cloruro de calcio están ampliamente distribuidas, su solubilidad en agua fría es: 357, 344, 745 g/L, respectivamente. El cloruro, en forma de ion Cl^- , es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua, su contenido procede de fuentes naturales, aguas residuales y vertidos industriales. El efecto antropogénico está mayormente asociado con el ion sodio [21].

Para realizar la medición de cloruros se llevaran a cabo los siguientes pasos: Verificar que exista cantidad suficiente de titulante Nitrato de plata 0,01 M ubicada en las unidades intercambiables, se conecta el electrodo rellenable con KNO_3 1M (con el orificio de entrada de la solución electrolítica abierto). Colocar el electrodo y la punta de dosificación de la unidad intercambiable en el soporte de la estación del cambiador de muestras, previamente enjuagados con suficiente agua destilada. Ubicar en la raqueta del cambiador las muestras a analizar 100 ml por muestra adicione 5 mL de HNO_3 2 M. En el Tiamo en el ambiente puesto de trabajo, se selecciona en cargar el método Llamado "Cloruros" y se le da cargar, verificar que las muestras del cambiador demuestras estén en el orden del método cargado. Pulsar Start para iniciar el análisis de las muestras. Al finalizar las titulaciones retire del soporte de la estación del cambiador de muestras

la punta de dosificación de la unidad intercambiable y el electrodo, verificando que el electrodo quede tapado.

2.2.5 Nitritos técnica colorimétrica

Los niveles de nitratos y nitritos en aguas naturales son un indicador importante de la calidad del agua. Ambos se encuentran relacionados con el ciclo del nitrógeno de suelo y plantas superiores, aunque los nitratos son añadidos por medio de fertilizantes que puede ocasionar que los niveles de estos aumenten. Los nitritos también se forman durante la biodegradación de nitratos, nitrógeno amoniacal u otros compuestos orgánicos nitrogenados y se utiliza como indicador de contaminación fecal en aguas naturales [22].

Filtre cada una de las muestras hasta obtener 50mL. Transvase a los Erlenmeyer de 250mL correspondientes. Adicione 2 mL de sulfanilamida y mezcle. Lea en el espectrofotómetro. DR 6000> Programas favoritos> programa 9003NITRITOS CELDA CUADRADA 1” Primero pasar el blanco oprimiendo cero para mediato y luego empezar a medir las muestras y patrones con la celda de 1 "cuadrada de vidrio.

2.2.6 Sulfatos técnica nefelométrica

Los sulfatos son compuestos que se encuentran presentes en el agua de forma natural, debido al lavado y la disolución parcial de materiales del terreno por el que discurre (formaciones rocosas compuestas de yeso principalmente y suelos sulfatados). Se han encontrado altas concentraciones tanto en las aguas subterráneas como en las superficies que proceden de fuentes naturales, es decir que no han estado sometidas a contaminación antropogénica. Éstos compuestos también pueden aparecer en el agua a través de los desechos y vertidos industriales y de los depósitos atmosféricos [23].

Encienda el turbidímetro. Lave la celda con agua destilada antes de ser usada. Adicione a cada una de las muestras de 50 mL de Buffer Sulfato suministrada buffer de alta y crudas y blanco buffer de baja. Mezcle hasta que quede bien homogenizado. Mida la turbiedad •adicione una cucharita rasa de cloruro de bario y agite durante 1 min. Lea la turbiedad después de dejar reaccionar la muestra 5 min sin agitación.

2.2.7 Hierro

El hierro (Fe) en el agua natural proviene de la disolución de las rocas y minerales donde se encuentra contenido. También puede incrementarse artificialmente, porque es muy utilizado en las industrias y existe la posibilidad de vertidos industriales ferrosos en el agua. En aguas de superficie

el hierro se encuentra en niveles muy bajos, ya que en estas aguas el ión hierro es prácticamente insoluble. Por otro lado, el hierro divalente no se encuentra normalmente en este tipo de aguas debido a que se encuentra en condiciones anaeróbicas y la presencia de oxígeno provoca su rápida oxidación. Las aguas subterráneas tienen mayores concentraciones de hierro ya que la materia orgánica del suelo absorbe el oxígeno disuelto del agua, normalmente las aguas con gran carga orgánica suelen tener más Fe produciéndose así asociaciones y complejos entre ellos cuya eliminación y potabilización puede ser problemática [24].

La medición de hierro se realiza mediante un equipo de absorción atómica, calibrando la curva de absorción con patrones preparados, como la muestra a procesar es agua cruda, esta se debe filtrar, primeramente, luego someterla a digestión ácida y últimamente pasarla por el equipo de absorción atómica.

Figura 7

Equipo de absorción atómica



Nota. En la figura se muestra un equipo de absorción atómica.

2.2.8 Manganese

El manganeso es aportado naturalmente a las aguas superficiales y subterráneas a partir de las rocas y el suelo, por ello es muy común que se encuentre en fuentes de abastecimiento de sistemas de acueducto [25]. La medición del contenido de manganeso en las muestras se realiza de la misma forma que la medición de hierro, se calibra la curva de absorción mediante patrones preparados a

distintas concentraciones de manganeso, las muestras se filtran, se someten a digestión ácida y se procesan mediante el equipo de absorción atómica.

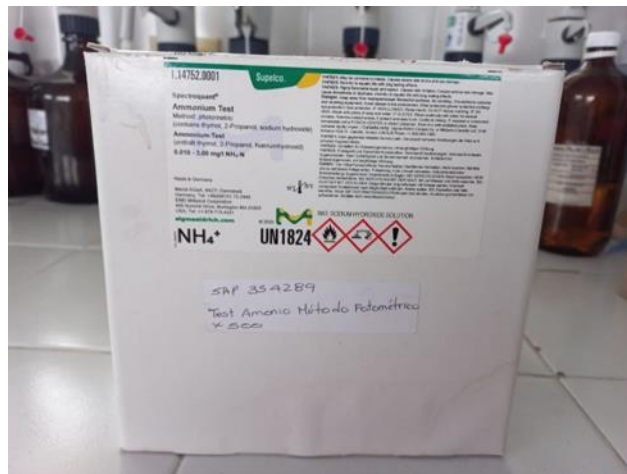
2.2.9 Amonio

El amonio está presente en el agua como resultado de la descomposición de materia orgánica de plantas y animales, diversas actividades industriales, la desaminación microbiana de las proteínas en un proceso denominado amonificación y por ser el principal producto de excreción de los organismos debido a la necesidad de una alimentación con alta concentración proteica [26].

Para determinar el contenido de amonio en una muestra se mide por fotometría, para ello se emplea el kit “ammonium test” proveído por Merk, se emplean los reactivos que vienen en dicho kit siguiendo la metodología especificada en el mismo para finalmente procesar la muestra mediante el espectrofotómetro. Al tratarse de agua cruda es crucial filtrarla antes de su procesamiento, puesto que se medirá por fotometría, la turbiedad y las partículas en suspensión pueden afectar la lectura del equipo.

Figura 8

Ammonium Test



Nota. En la figura se muestra kit para determinar la concentración de amonio.

2.3 Parámetros microbiológicos

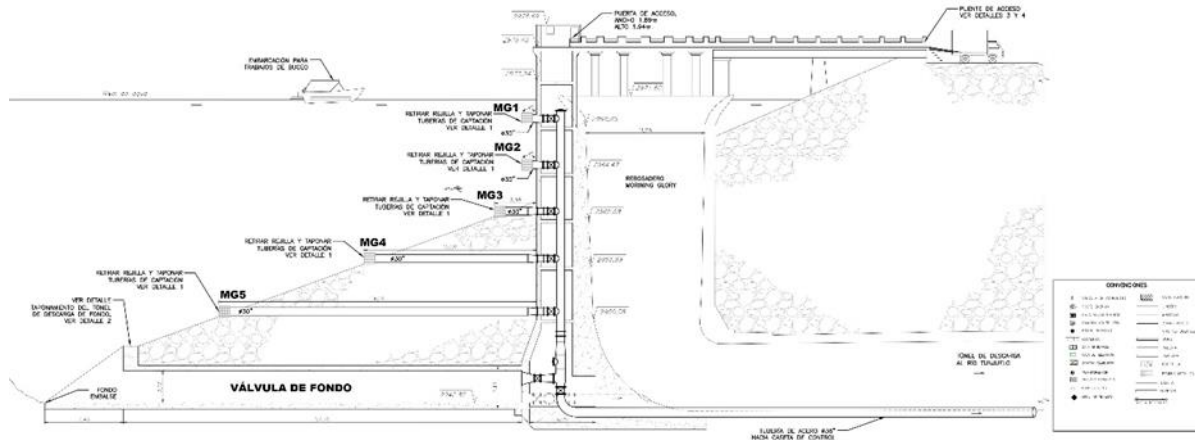
Los parámetros microbiológicos están relacionados con las pruebas de laboratorio que se realizan a muestras con el fin de determinar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos,

a partir de estos, se puede establecer la potabilidad del agua. Entre los parámetros microbiológicos, se encuentran los Coliformes fecales, *Escherichia coli*, entre otros. Es de vital importancia evitar la presencia de coliformes fecales, las cuales son bacterias indicadoras de contaminación de desechos humanos, según la norma [27].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Figura 9

Sistema Morning Glory del embalse la regadera



Nota. Diseño para la rehabilitación del sistema Morning Glory del embalse La Regadera fase II 2016 [marzo 20 2023]; Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Para tener una mejor visión de la figura, consultar el Anexo 1.

En este capítulo se realizan los análisis correspondientes a las caracterizaciones de las muestras y junto a esto se asocian a factores externos como lo son las precipitaciones en la zona, la dirección y velocidad de los vientos; esto con el fin de desarrollar los dos primeros objetivos que se plantean para cumplir con el objetivo general del documento.

El sistema Morning Glory que tiene el embalse La Regadera dispone de una serie de válvulas de compuerta, ubicadas a distintas profundidades para la captación del recurso hídrico, dichas válvulas se denominaron en la planta como MG, de esta manera coloquialmente se enumeran “MG1, MG2, MG3, MG4, MG5 y Válvula de fondo” siendo la MG1 la válvula mar cercana a la superficie y de manera descendiente se enumeran hasta llegar a la válvula de fondo, de dicha forma se hace referencia en este documento.

Con el objetivo de caracterizar el agua contenida en el embalse, el muestreo se realizó mediante las MG, con la premisa de que a diferentes profundidades del embalse se encontrarían aguas con características diferentes; para ello cada una de las válvulas dispone de un bypass por el cual se extraería la muestra luego de dejar correr el agua por lo menos durante 5 minutos, seguido de

purgar el recipiente de muestreo para así obtener una muestra representativa del agua que se capta por cada una de las válvulas.

No se realizó muestreo mediante la válvula de fondo, debido a que esta se usa normalmente para asegurar el caudal ecológico al río Tunjuelo o para disminuir el nivel del embalse sí se requiere.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para la caracterización del agua son turbiedad, color aparente, pH, hierro, manganeso y amonio; estas características fisicoquímicas se escogieron para ser más específicos con el fin del documento que es brindar información primaria para el proceso de potabilización del agua y el de brindar alternativas de tratamiento para el contenido de hierro, manganeso y amonio; además de ello, asociar el comportamiento de estos parámetros a factores como las lluvias y el movimiento del embalse.

En la siguiente tabla se evidencian los 56 muestreos realizados y cuáles parámetros se pudieron medir para el agua recolectada por medio de las válvulas de captación; las características fisicoquímicas a medir fueron turbiedad, color aparente, pH, hierro, manganeso y amonio; así mismo se realiza una observación del por qué no se obtuvieron datos en algunas de las fechas de muestreo.

Tabla 3*Muestras realizadas y parámetros vinculados*

| Toma de muestra | | Parámetros analizados | | | | | | Observación |
|-----------------|---------|-----------------------|--------|------|--------|-----------|--------|---|
| Fecha | Muestra | Turbiedad | Color | pH | Hierro | Manganeso | Amonio | |
| 20/04/2022 | MG1 | | | | | | | No se obtuvieron valores de los parámetros medidos, debido a que el nivel del embalse no permitió muestrear mediante la MG1 |
| | MG2 | 3,45 | 32,30 | 6,75 | 0,870 | 0,143 | 0,077 | |
| | MG3 | 7,54 | 49,50 | 6,48 | 3,410 | 0,279 | 1,130 | |
| | MG4 | 7,23 | 71,50 | 6,47 | 2,890 | 0,412 | 1,866 | |
| | MG5 | 52,60 | 380,00 | 6,46 | 3,560 | 1,730 | 2,441 | |
| 28/04/2022 | MG1 | 44,90 | 84,10 | 6,65 | 0,708 | 0,196 | 0,553 | |
| | MG2 | 50,70 | 88,90 | 6,60 | 0,876 | 0,309 | 0,652 | |
| | MG3 | 43,60 | 83,80 | 6,85 | 0,670 | 0,276 | 0,583 | |
| | MG4 | 45,40 | 84,00 | 6,70 | 0,474 | 0,220 | 0,665 | |
| | MG5 | 40,10 | 79,20 | 6,65 | 0,335 | 0,162 | 1,833 | |
| 3/05/2022 | MG1 | 21,90 | 56,40 | 6,63 | 3,250 | 0,160 | 0,523 | |
| | MG2 | 27,60 | 56,20 | 6,58 | 3,915 | 0,225 | 0,750 | |
| | MG3 | 25,60 | 59,50 | 6,85 | 3,637 | 0,249 | 1,021 | |
| | MG4 | 24,30 | 56,40 | 6,62 | 4,264 | 0,336 | 1,303 | |
| | MG5 | 19,60 | 52,40 | 6,61 | 3,426 | 0,372 | 2,278 | |
| 10/05/2022 | MG1 | 29,50 | 61,60 | 6,62 | 2,270 | 0,089 | 0,632 | |
| | MG2 | 28,90 | 64,50 | 6,52 | 2,525 | 0,144 | 0,693 | |
| | MG3 | 25,80 | 64,80 | 6,60 | 3,511 | 0,196 | 0,731 | |
| | MG4 | 25,60 | 66,10 | 6,51 | 2,874 | 0,228 | 1,294 | |
| | MG5 | 19,90 | 63,20 | 6,58 | 2,907 | 0,361 | 1,978 | |
| 17/05/2022 | MG1 | 30,20 | 61,70 | 6,55 | 2,249 | 0,066 | 0,819 | |

| | | | | | | | | |
|------------|-----|--------|--------|------|-------|-------|-------|--|
| | MG2 | 38,50 | 81,10 | 6,49 | 3,836 | 0,176 | 1,369 | |
| | MG3 | 29,60 | 75,50 | 6,42 | 3,573 | 0,284 | 1,732 | |
| | MG4 | 33,40 | 81,40 | 6,45 | 3,487 | 0,388 | 1,225 | |
| | MG5 | 30,00 | 80,30 | 6,48 | 4,229 | 0,417 | 1,399 | |
| 11/08/2022 | MG1 | 28,20 | 27,90 | 6,82 | 1,690 | 0,263 | 0,275 | |
| | MG2 | 35,60 | 73,10 | 6,59 | 2,250 | 0,311 | 0,288 | |
| | MG3 | 41,50 | 89,00 | 6,44 | 2,820 | 0,434 | 0,407 | |
| | MG4 | 92,40 | 181,90 | 6,36 | 6,530 | 0,800 | 0,485 | |
| | MG5 | 150,00 | 210,80 | 6,33 | 9,880 | 0,850 | 0,599 | |
| 4/01/2023 | MG1 | | | | | | | No se obtuvieron valores de los parámetros medidos debido a que el nivel del embalse no permitió muestrear mediante la MG1 |
| | MG2 | 4,59 | 26,00 | 6,26 | 0,630 | 0,085 | 0,070 | |
| | MG3 | 3,72 | 27,60 | 6,11 | 0,750 | 0,092 | 0,078 | |
| | MG4 | 8,03 | 38,60 | 6,12 | 1,510 | 0,150 | 0,470 | |
| | MG5 | 15,50 | 62,60 | 6,12 | 2,940 | 0,303 | 0,587 | |
| 13/01/2023 | MG1 | 19,40 | 53,60 | 6,53 | 1,240 | 0,216 | 0,178 | |
| | MG2 | 27,30 | 66,10 | 6,46 | 1,120 | 0,316 | 0,270 | |
| | MG3 | 27,80 | 69,90 | 6,44 | 1,410 | 0,325 | 0,562 | |
| | MG4 | 26,20 | 67,20 | 6,39 | 0,690 | 0,318 | 0,264 | |
| | MG5 | 30,00 | 72,40 | 6,36 | 1,200 | 0,318 | 0,473 | |
| 18/01/2023 | MG1 | 9,57 | 37,00 | 6,94 | 0,810 | 0,110 | 0,163 | |
| | MG2 | 14,40 | 37,00 | 6,59 | 0,400 | 0,195 | 0,244 | |
| | MG3 | 16,20 | 50,00 | 6,52 | 1,160 | 0,211 | 0,304 | |
| | MG4 | 17,70 | 53,00 | 6,48 | 1,680 | 0,223 | 0,337 | |
| | MG5 | 18,20 | 53,00 | 6,43 | 1,300 | 0,225 | 0,290 | |
| 9/02/2023 | MG1 | | | | | | | No se obtuvieron valores de los parámetros medidos, debido a que el nivel del embalse no |
| | MG2 | | | | | | | |
| | MG3 | 11,30 | 47,70 | 6,04 | 2,820 | 0,214 | 0,498 | |
| | MG4 | 15,00 | 57,00 | 6,29 | 3,050 | 0,268 | 0,488 | |

| | | | | | | | | |
|------------|-----|--------|--------|-----------|-------|-------|-------|--|
| | MG5 | 19,20 | 67,70 | 6,26 | 4,390 | 0,340 | 0,694 | permitió muestrear mediante la MG1 y MG2 |
| 23/02/2023 | MG1 | | | | | | | No se obtuvieron valores de los parámetros medidos, debido a que el nivel del embalse no permitió muestrear mediante la MG1 y MG2 |
| | MG2 | | | | | | | |
| | MG3 | 37,40 | 87,40 | 6,68 | 1,371 | 0,345 | 0,060 | |
| | MG4 | 22,70 | 79,20 | 6,24 | 1,982 | 0,398 | 0,340 | |
| | MG5 | 24,60 | 80,20 | 6,3 | 2,537 | 0,490 | 0,410 | |
| 28/02/2023 | MG1 | | | | | | | No se obtuvieron valores de los parámetros medidos, debido a que el nivel del embalse no permitió muestrear mediante la MG1, MG2 y MG3 |
| | MG2 | | | | | | | |
| | MG3 | | | | | | | |
| | MG4 | 70,40 | 170,00 | 6,3 | 1,640 | 0,471 | 0,459 | |
| | MG5 | 132,00 | 250,00 | 6,29 | 2,151 | 0,721 | 0,498 | |
| 16/03/2023 | MG1 | 42,80 | 86,50 | 6,73 | 0,800 | 0,429 | 0,107 | |
| | MG2 | 47,90 | 97,60 | 6,5 | 1,100 | 0,558 | 0,129 | |
| | MG3 | 48,10 | 100,90 | 6,47 | 2,200 | 0,623 | 0,116 | |
| | MG4 | 50,40 | 105,40 | 6,39 | 1,830 | 0,690 | 0,278 | |
| | MG5 | 58,10 | 115,50 | 6,27 | 1,870 | 0,594 | 0,349 | |
| Tomada | | | | No Tomada | | | | |

Nota. se muestra en la tabla los muestreos realizados con cada uno de los parámetros asociados y la razón del no muestreo.

3.1 Caracterización y análisis de las aguas del embalse junto a factores hidroclimatológicos y meteorológicos

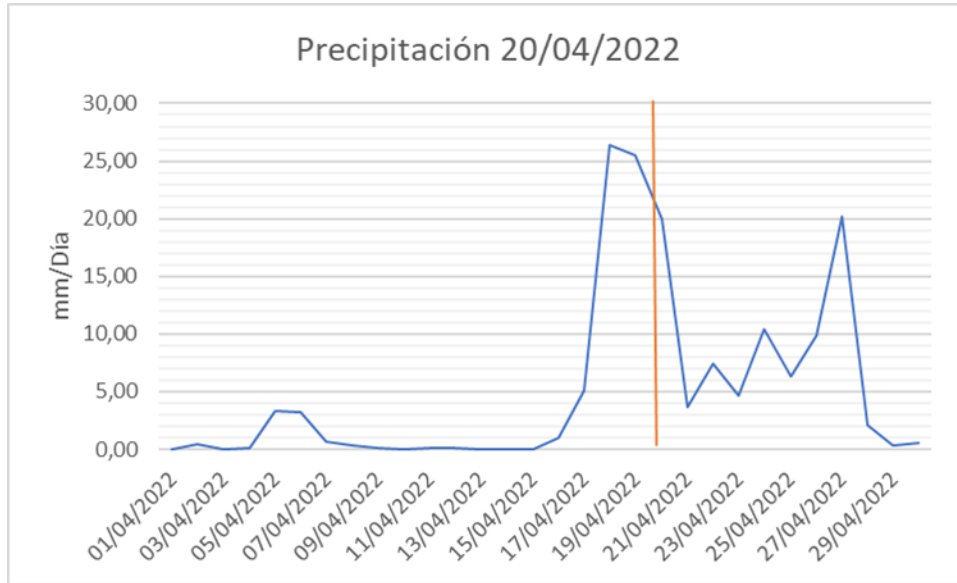
En este subcapítulo se realizará un análisis sobre los resultados obtenidos para la caracterización del agua a partir de las muestras recolectadas, considerando la posible influencia de factores externos como lo son las precipitaciones, dirección y velocidad del viento; de esta manera se desarrollarán los dos primeros objetivos propuestos.

Las diferentes mediciones realizadas a las muestras recolectadas de cada una de las válvulas para la caracterización fisicoquímica del agua fueron desarrolladas por parte de los autores en las fechas estipuladas desde el 20 marzo hasta el 17 de mayo, el resto de los datos, se obtuvieron del laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

De igual forma los datos de precipitación, dirección y velocidad del viento, se suministraron por el departamento de hidrología empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá, obtenidos de la estación hidroclimatológica y meteorológica en La regadera.

Figura 10

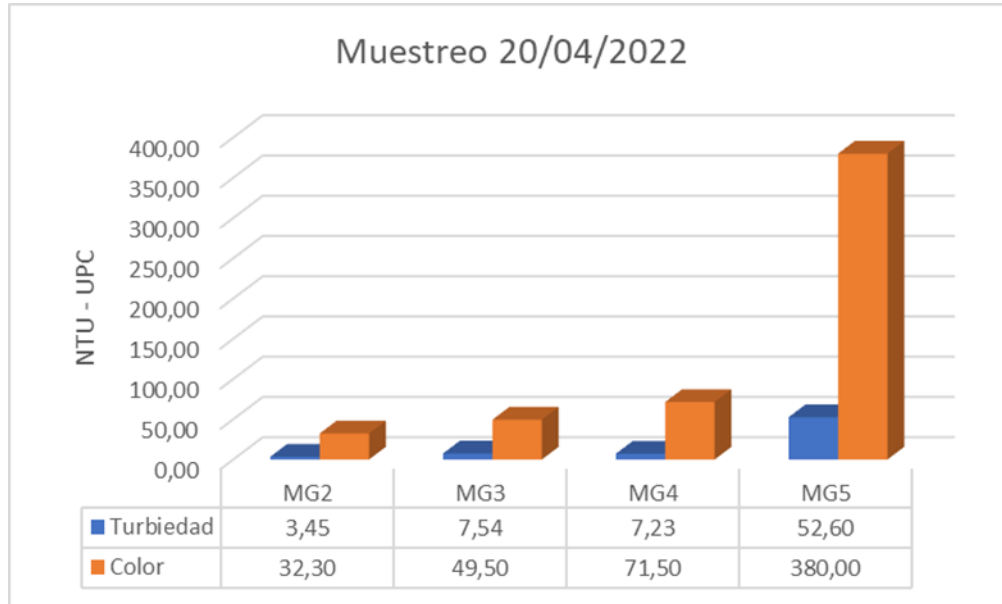
Lluvias 20/04/2022



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 11

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 20/04/2022

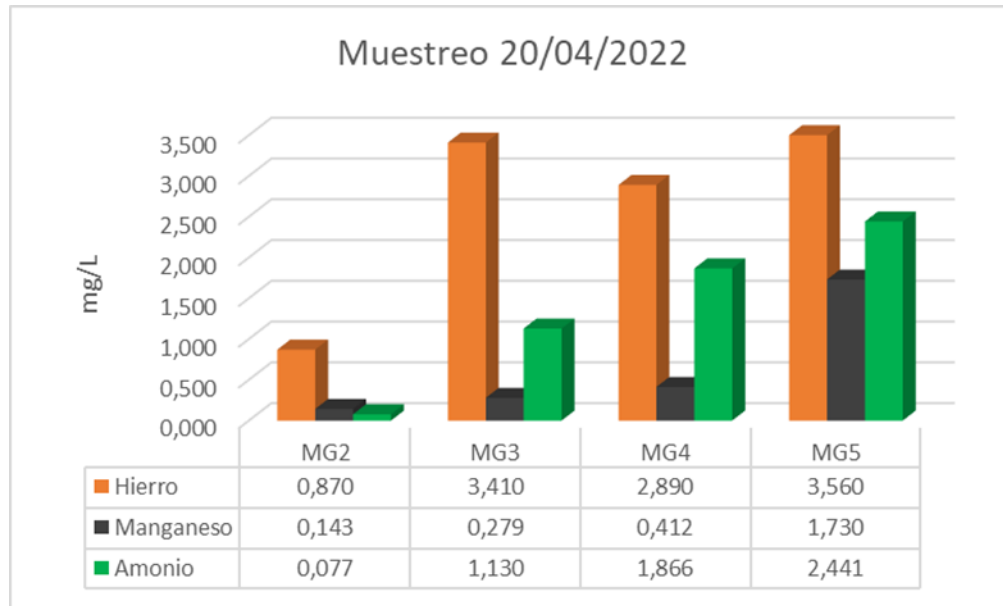


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Al momento del muestreo sólo se pudo tomar de muestra de 4 de las válvulas debido a que el nivel del embalse estaba por debajo de la MG1, causa de una temporada de sequía, las precipitaciones habían empezado 2 días antes por lo cual se muestra gran diferencia en el agua a diferentes profundidades siendo el fondo del embalse el que presentaba una mayor turbiedad y color.

Figura 12

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 20/04/2022

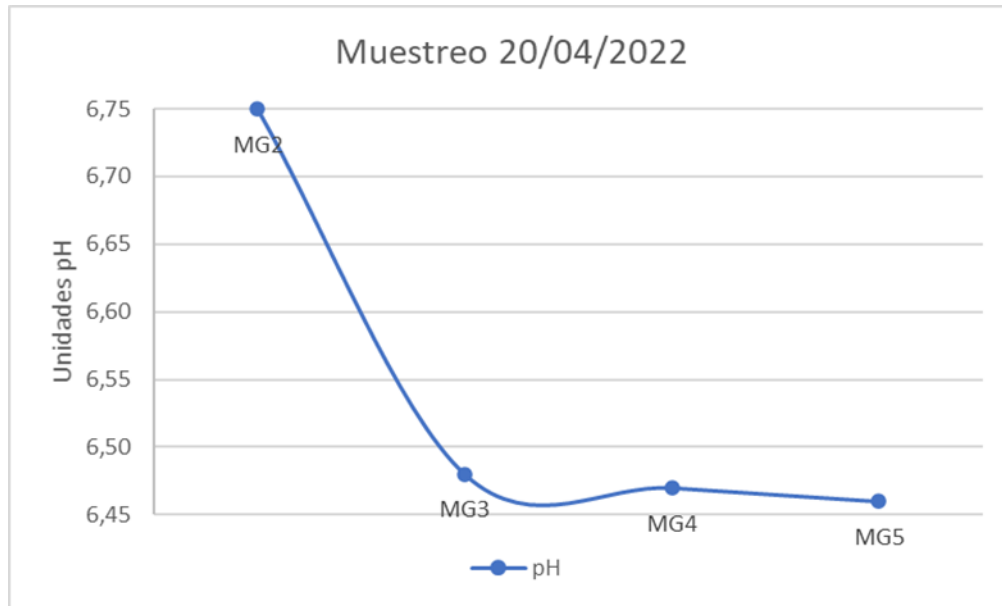


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Otros parámetros que nos permiten afirmar que la calidad del agua difiere acorde a la profundidad de su captación son: contenido de hierro, manganeso y amonio. Los datos obtenidos para estos tres parámetros muestran la diferencia entre el agua superficial y el agua que se encuentra a mayor profundidad del embalse. Mientras el comportamiento del hierro contenido en el agua muestra una diferencia significativa entre el agua captada por la MG2 de las demás; el contenido de manganeso y amonio establece que a medida que se aumenta la profundidad de captación, la concentración de estas especies aumenta progresivamente.

Figura 13

pH en la muestra tomada el 20/04/2022

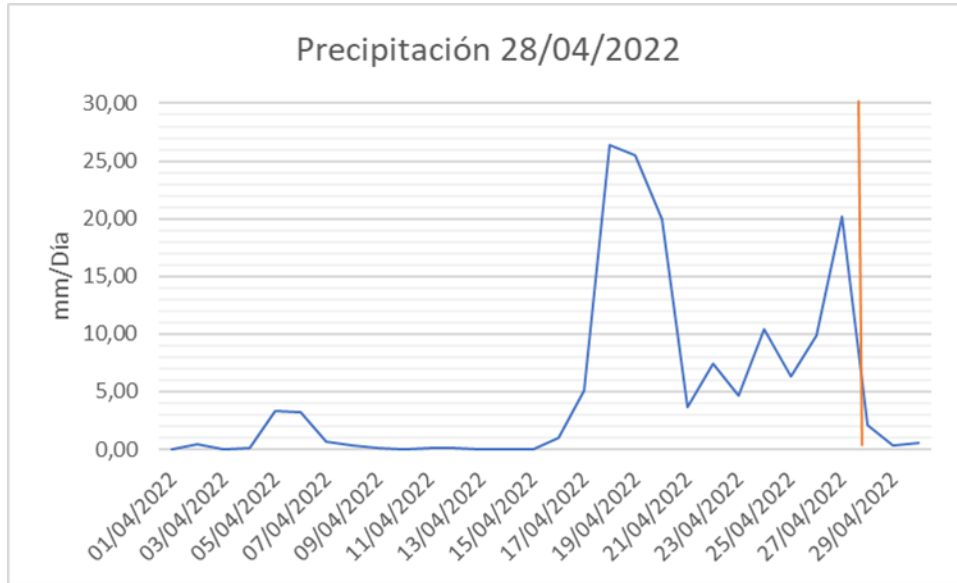


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Mediante la medida del pH también se puede establecer la diferencia del agua a diferentes profundidades y a pesar de que no haya gran diferencia en el pH a distintas profundidades, el cambio se puede deber a mayor cantidad de minerales en esas profundidades, así como la presencia de organismos y materia orgánica que pueden cambiar levemente el pH del agua.

Figura 14

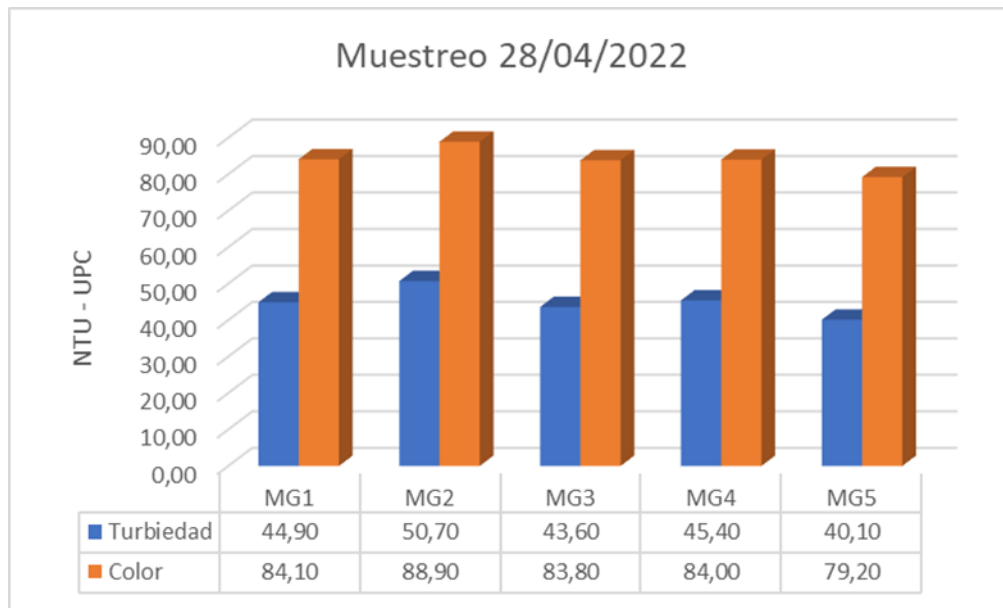
Lluvias 28/04/2022



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 15

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 28/04/2022



Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

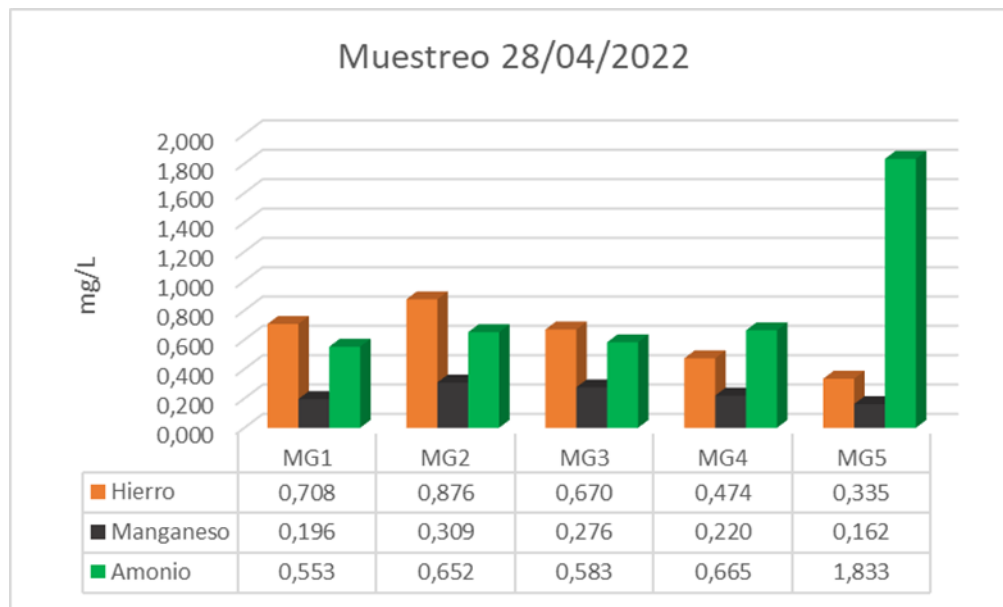
Como lo muestra la gráfica de precipitaciones en el mes de abril del 2022, ya habían transcurrido varios días de constantes lluvias, gracias a esto, el embalse aumento su nivel de contenido de agua, permitiendo la captación de agua desde la MG1 hasta la MG5.

Debido a las lluvias también se rompió la diferencia existente en el agua a diferentes profundidades, esto se estableció mediante la caracterización de las diferentes muestras tomadas el día 28 de abril de 2022, pues los datos obtenidos indican que el agua del embalse sufrió una homogenización la cual se puede asociar al aumento de las precipitaciones y del caudal de los afluentes de La Regadera.

La medición y comparación de la turbiedad y color aparente en las muestras evidencian la similitud del agua recolectada por cada una de las válvulas, pues los niveles de turbiedad y color aparente aumentaron en las válvulas superiores y a su vez disminuyeron en las válvulas inferiores, de esta manera se puede demostrar la homogenización del agua en el embalse.

Figura 16

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 28/04/2022



Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado

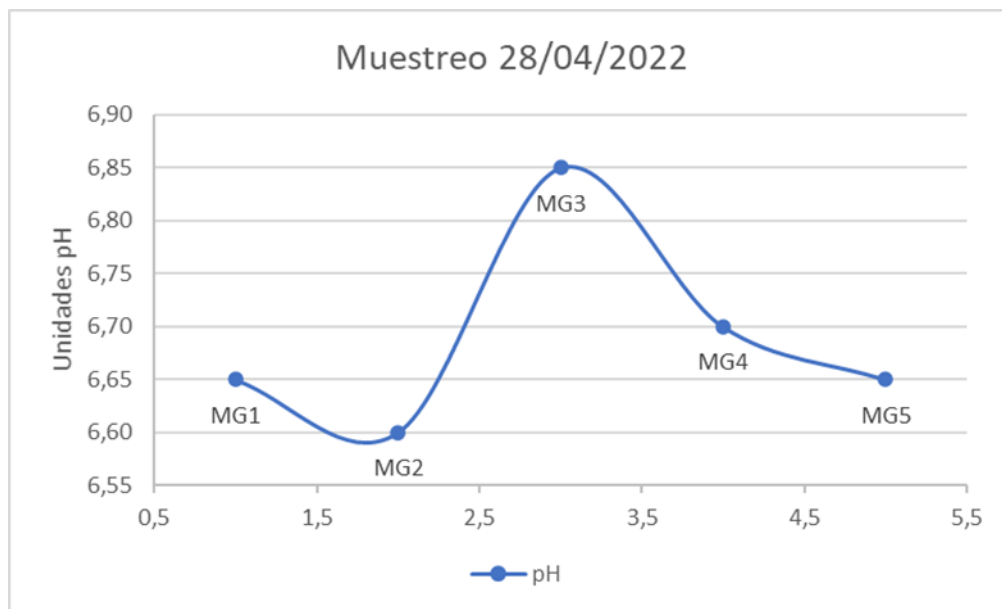
Al igual que la anterior gráfica, esta muestra cómo el agua del embalse se ha homogeneizado; en cuanto al hierro, se muestran concentraciones inversamente proporcionales a la profundidad del

embalse, aunque no muy distantes cómo se mostraba en los datos del primer muestreo proveniente de una época de “sequía”. Al igual que con el hierro, las concentraciones de manganeso son muy similares en cada una de las muestras.

Los datos obtenidos en el anterior muestreo, denotaban que la concentración de amonio aumenta a medida que incrementa la profundidad del embalse, en esta ocasión, la concentración de amonio se igualó para las primeras cuatro MG mientras que en el fondo del embalse se observaba una concentración de amonio muy superior en comparación, esto se puede atribuir al levantamiento del suelo del embalse, causa del movimiento de las aguas contenidas en el mismo; el suelo del embalse contiene mayor materia orgánica depositada que está directamente asociada a los contenidos de amonio en las aguas.

Figura 17

pH en la muestra tomada el 28/04/2022

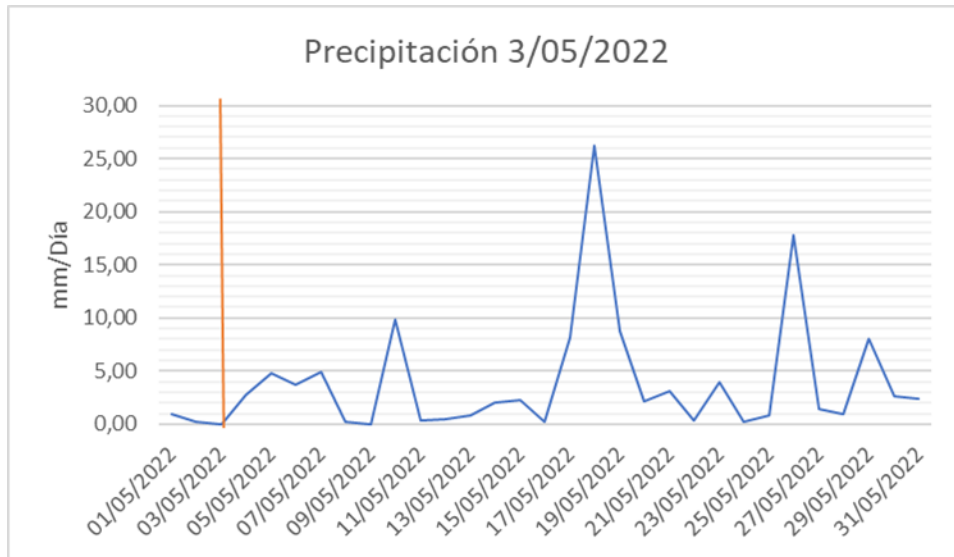


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado

Las medidas del pH nos ayudan a mostrar la homogeneidad sufrida en las aguas del embalse, mediante un parámetro cuyos niveles son muy similares entre sí.

Figura 18

Lluvias 3/05/2022



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 19

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 3/05/2022

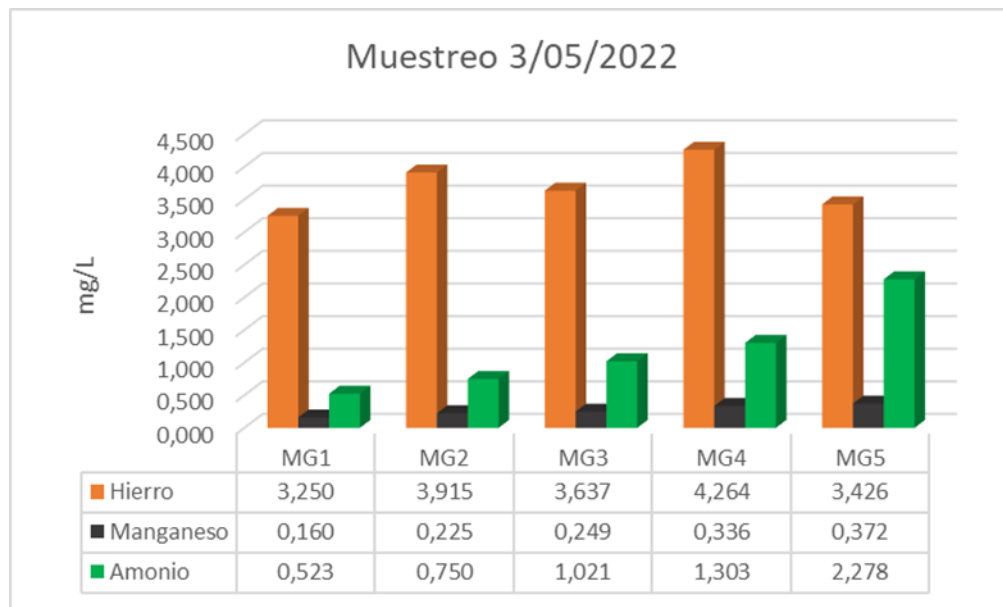


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Las mediciones tanto de turbiedad como de color aparente para las muestras tomadas el 3 de mayo de 2022 siguen reflejando el fenómeno de homogeneidad en las aguas del embalse, pues en cuanto a estos dos parámetros medidos, hay mucha similitud en las aguas tomadas a distintas profundidades de la represa.

Figura 20

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 3/05/2022

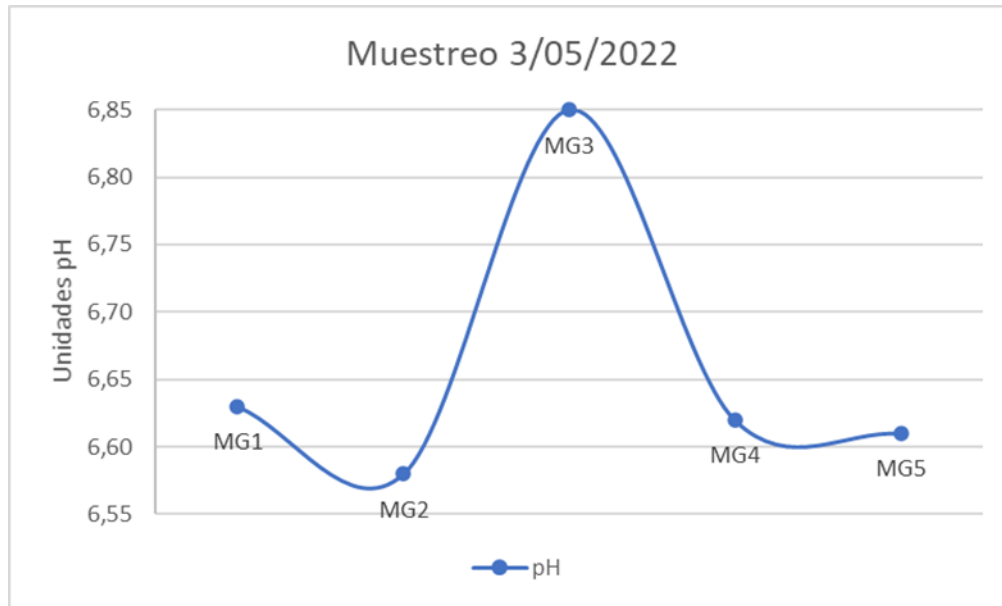


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Para este muestreo se evidencia un alto contenido de hierro en cada una de las muestras obtenidas, estas altas concentraciones se pueden deber al arrastre de sólidos y minerales por los altos caudales de los afluentes del embalse. Mientras tanto los niveles de manganeso se mantienen muy similares entre sí a las distintas profundidades del agua. A pesar de que el amonio empieza a comportarse de una manera “normal”. Se encuentra que su contenido se ha elevado, esto se puede asociar a las precipitaciones que se han presentado, pues el embalse está situado en la localidad de Usme kilómetro 22 vía Sumapaz, siendo un área rural donde se puede encontrar en su mayoría cultivos de papa y arveja, motivo por el cual la existencia de lluvias en la zona, pueden llevar los fertilizantes empleados en estas prácticas por escorrentía al cauce de los ríos, estos abonos poseen un alto contenido de amoníaco y compuestos nitrogenados, a los cuales se les puede atribuir el incremento de amonio en las aguas del embalse.

Figura 21

pH en la muestra tomada el 3/05/2022

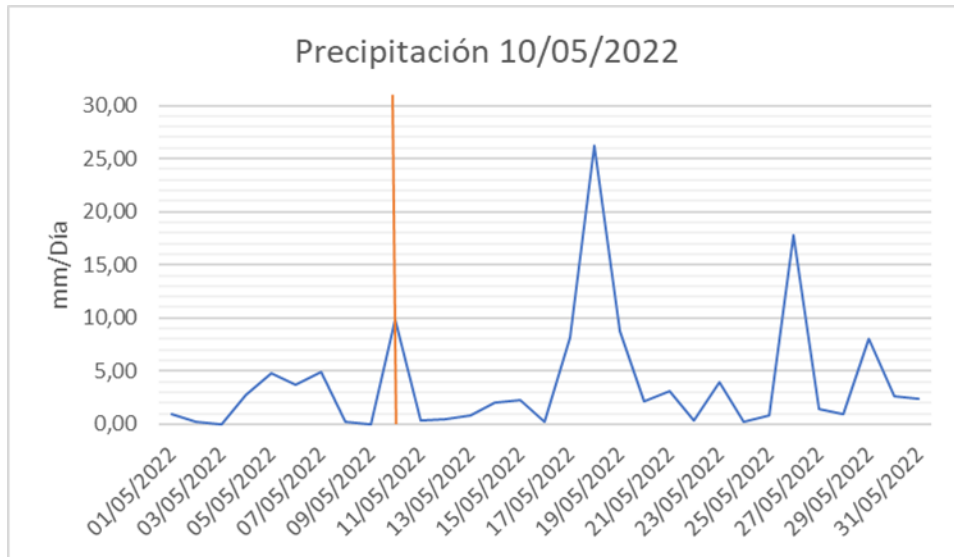


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Una vez más, la medición del pH en las aguas nos ayuda a inferir que este es un parámetro que varía poco en las aguas contenidas de La Regadera.

Figura 22

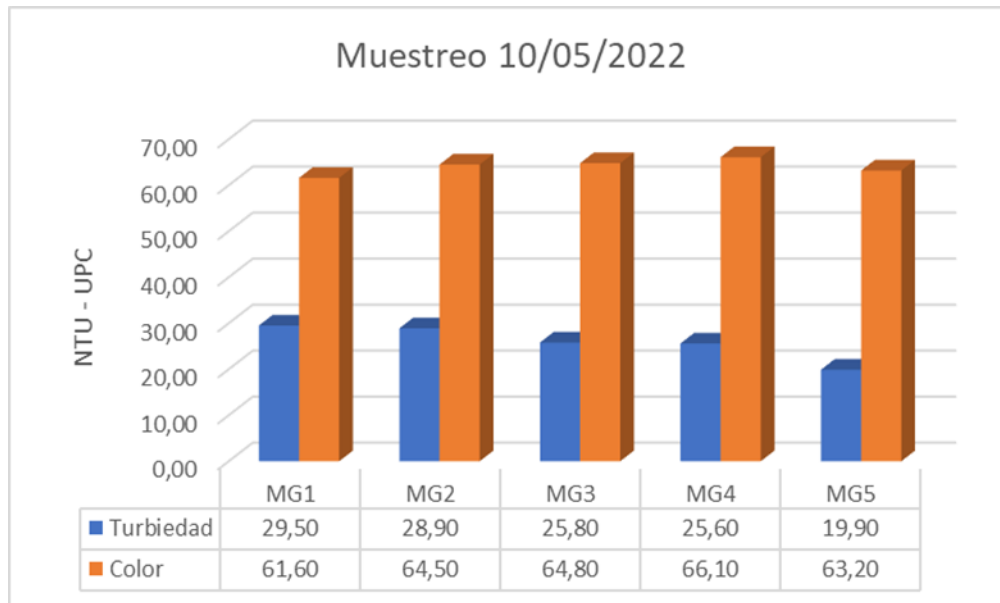
Lluvias 10/05/2022



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 23

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 10/05/2022

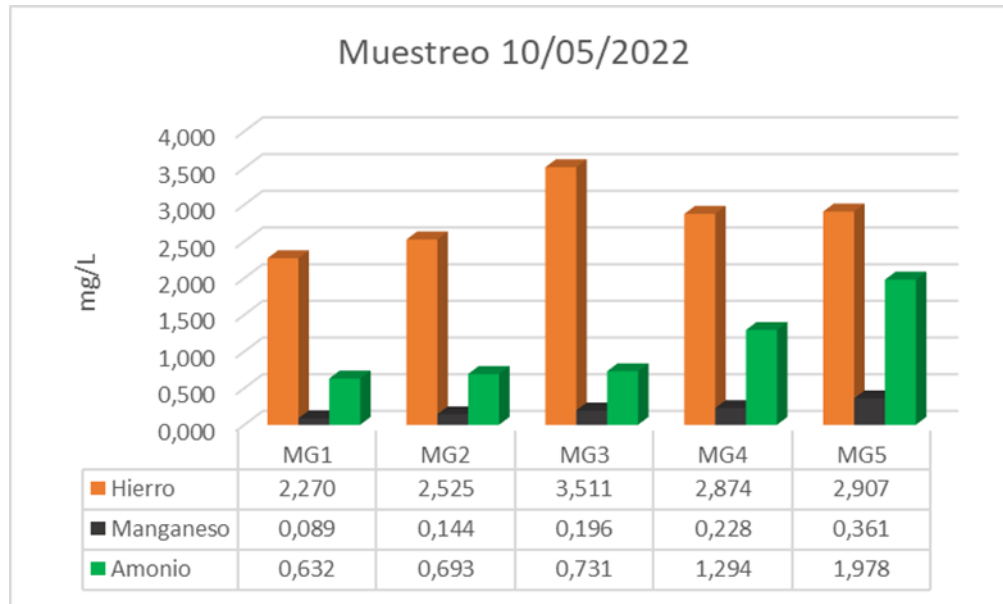


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Para el muestreo realizado el 10 de mayo de 2022 aún se evidencia el fenómeno de homogeneidad en las aguas en cuanto a turbiedad y color aparente medidos, se obtienen datos muy similares a los de la caracterización del muestreo anterior.

Figura 24

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 10/05/2022

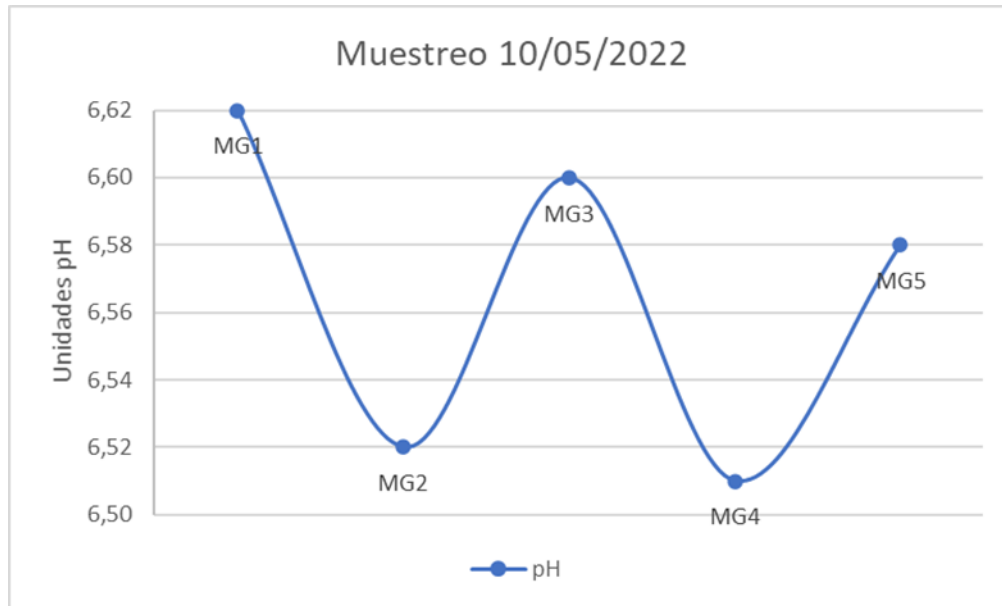


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Las mediciones de hierro en las aguas han disminuido sus niveles en comparación a los obtenidos en el anterior muestreo, a pesar de la similitud en las concentraciones de hierro, se empieza a evidenciar que el menor valor de hierro lo tiene el agua proveniente de la MG1 que es la más cercana a la superficie del cuerpo de agua. El comportamiento tanto del manganeso como del amonio empieza a comportarse de manera “normal” es decir proporcional a la profundidad de la captación, las diferencias en estos dos parámetros medidos empiezan a ser más notables y esto se puede deber a la disminución de las lluvias en la zona.

Figura 25

pH en la muestra tomada el 10/05/2022

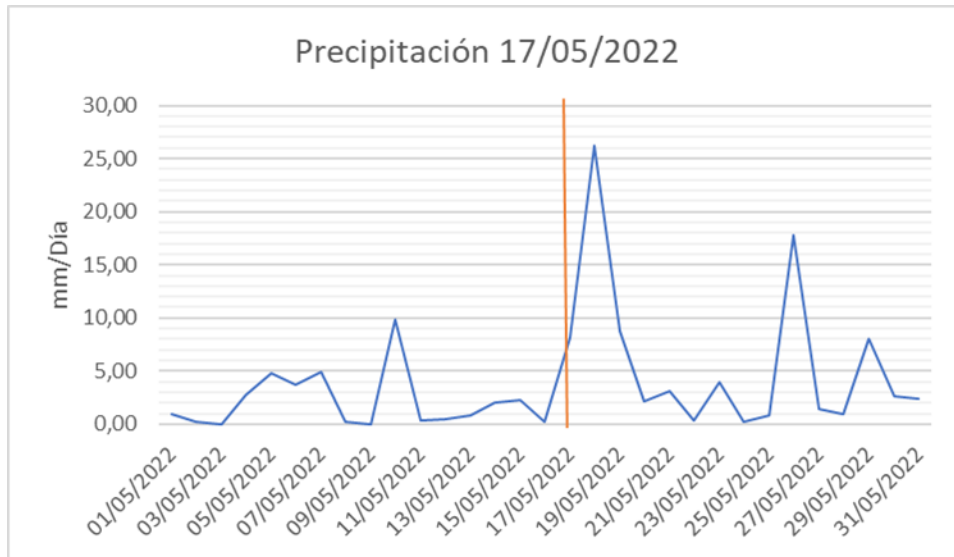


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

En cuanto a pH, se evidencia cómo las muestras presentan una cercanía entre sí, teniendo un máximo de 6,62 en la MG1 y un mínimo de 6,51 en la MG4; es decir la medición de pH varía en 0,11 unidades de pH.

Figura 26

Lluvias 17/05/2022



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

Figura 27

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 17/05/2022

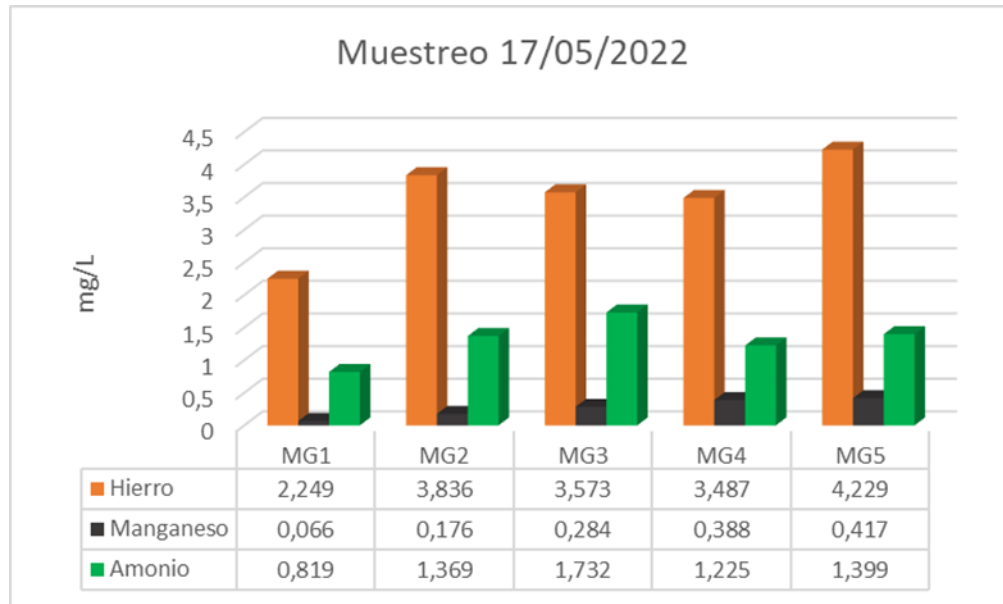


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Para la fecha de muestreo han disminuido los niveles de lluvias y a pesar de presentar una turbiedad muy similar a las diferentes profundidades del embalse, el color aparente que se presenta en la muestra obtenida de la MG1 tiene la menor medida siendo 61,70 UPC.

Figura 28

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 17/05/2022

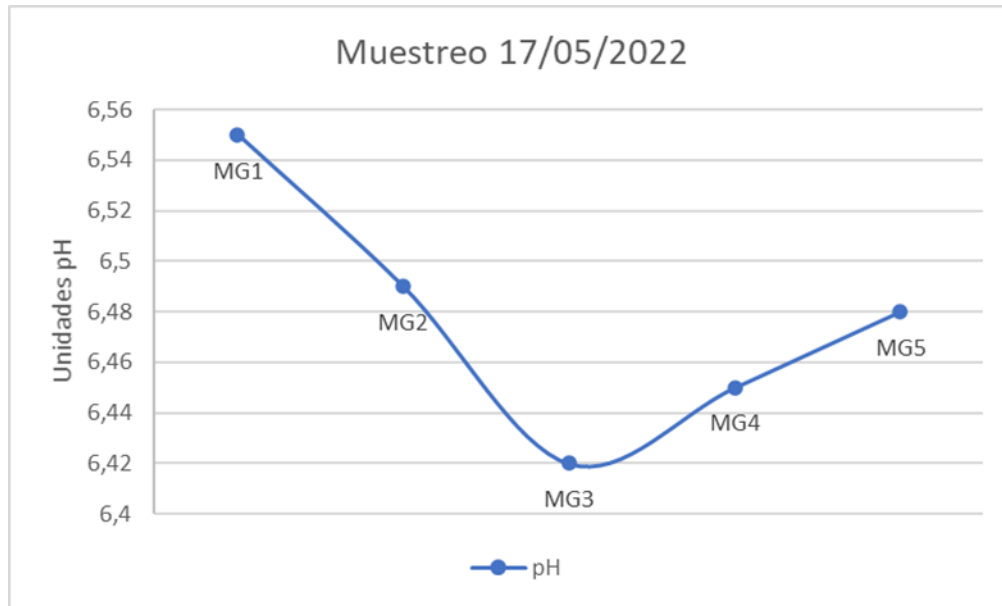


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

El comportamiento del hierro se asemeja al del muestreo anterior con ciertas diferencias que radican en que el valor mínimo se encuentra en las aguas superficiales siendo de 2,249 ppm, y el valor máximo se encuentra en el agua procedente del fondo del embalse, siendo 4,229 ppm que se puede presentar por la precipitación de los óxidos de hierro formados debido a la oxigenación del agua del embalse. Las concentraciones de manganeso se han normalizado en cuanto a comportamiento a los diferentes niveles. Las mediciones de amonio en las distintas muestras nuevamente presentan un comportamiento atípico a pesar de presentar un valor mínimo en las aguas que se captan más cerca de la superficie mediante la MG1.

Figura 29

pH en la muestra tomada el 17/05/2022

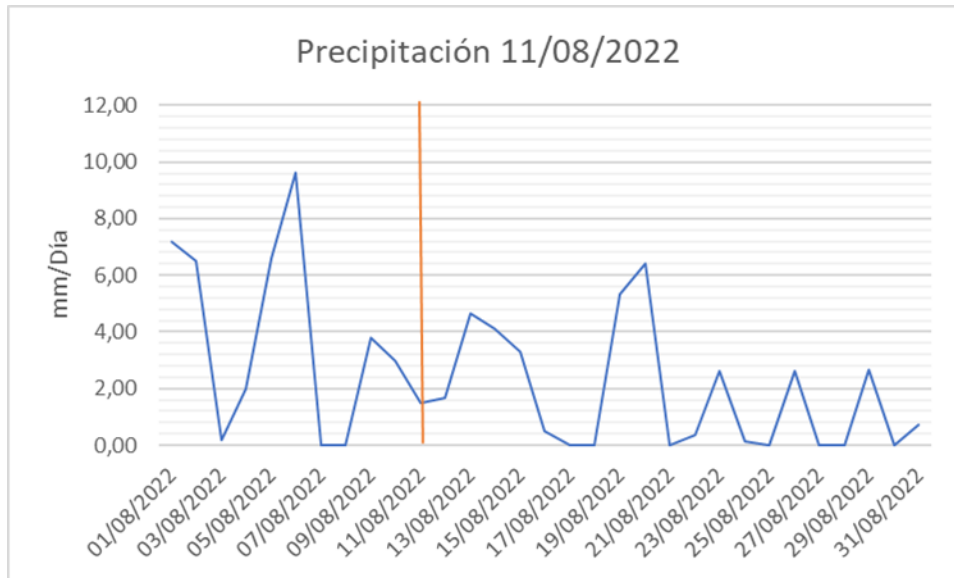


Nota. Datos obtenidos por los autores en el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Al igual que en los valores de pH obtenidos en la anterior caracterización, mostrando una gran cercanía entre los datos, teniendo un máximo de 6,55 y un mínimo de 6,42; es decir las diferencia entre las aguas gravita en 0,13 unidades de pH.

Figura 30

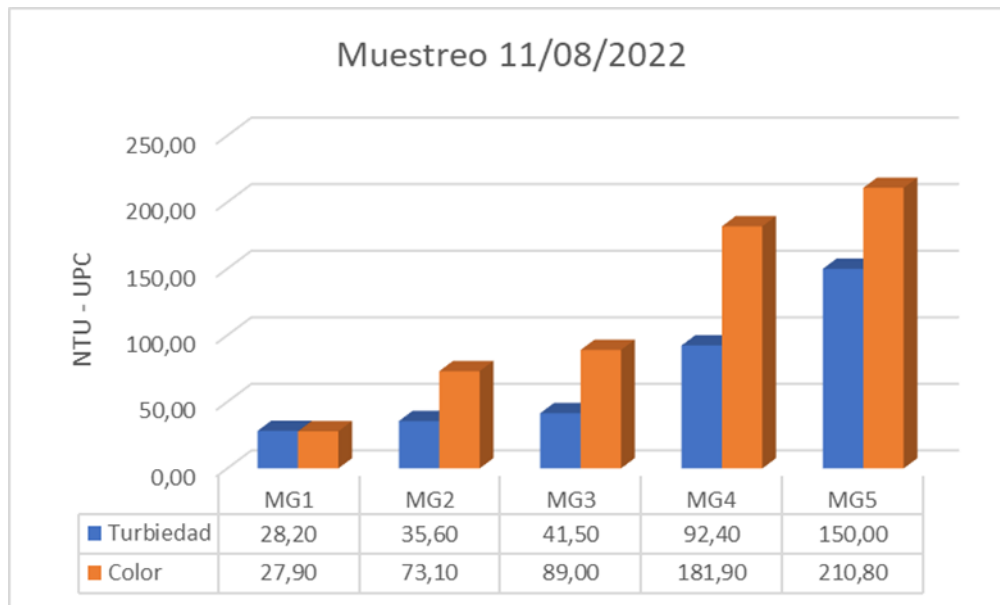
Lluvias 11/08/2022



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 31

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 11/08/2022

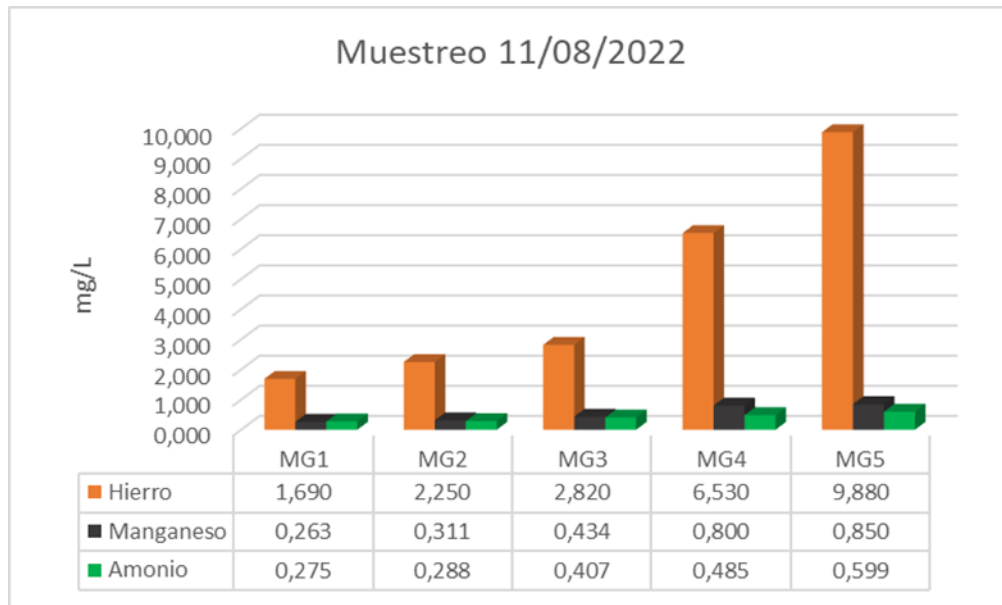


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Para la caracterización realizada en el mes de agosto se tiene que no se han presentado precipitaciones altas, por lo cual el comportamiento de las aguas del embalse se encuentra de una manera “normal” donde se puede evidenciar fácilmente las diferencias entre cada una de las profundidades del embalse en cuanto a Turbiedad y color aparente de las muestras analizadas.

Figura 32

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 11/08/2022

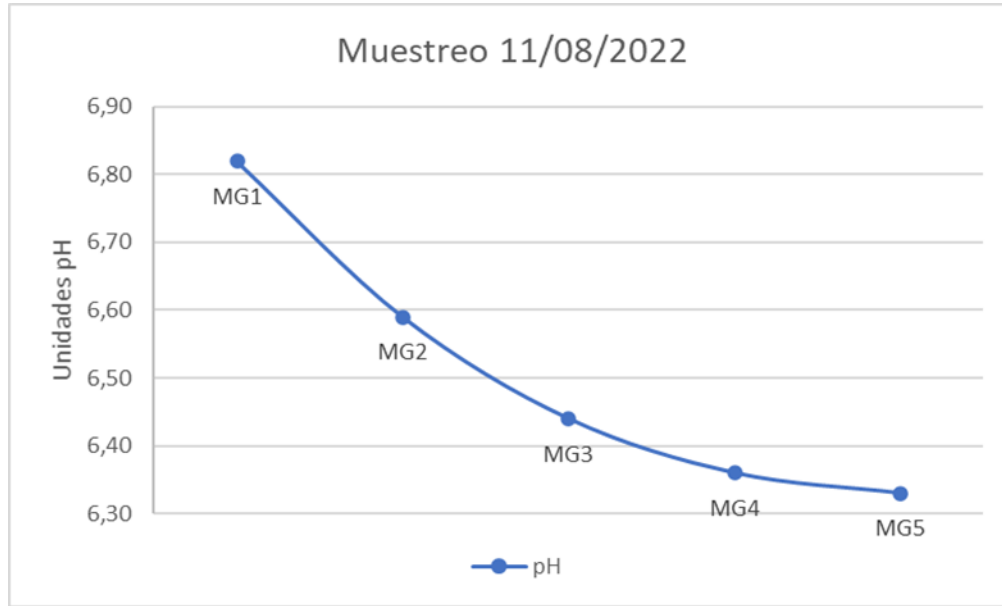


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Por lo mencionado anteriormente, el comportamiento del embalse también se refleja en la medición de hierro, manganeso y amonio, se observa cómo cada una de las MG capta aguas con calidades totalmente diferentes entre sí; este es el comportamiento que se espera observar en La Regadera durante temporadas de sequía o de operación normal de la represa.

Figura 33

pH en la muestra tomada el 11/08/2022

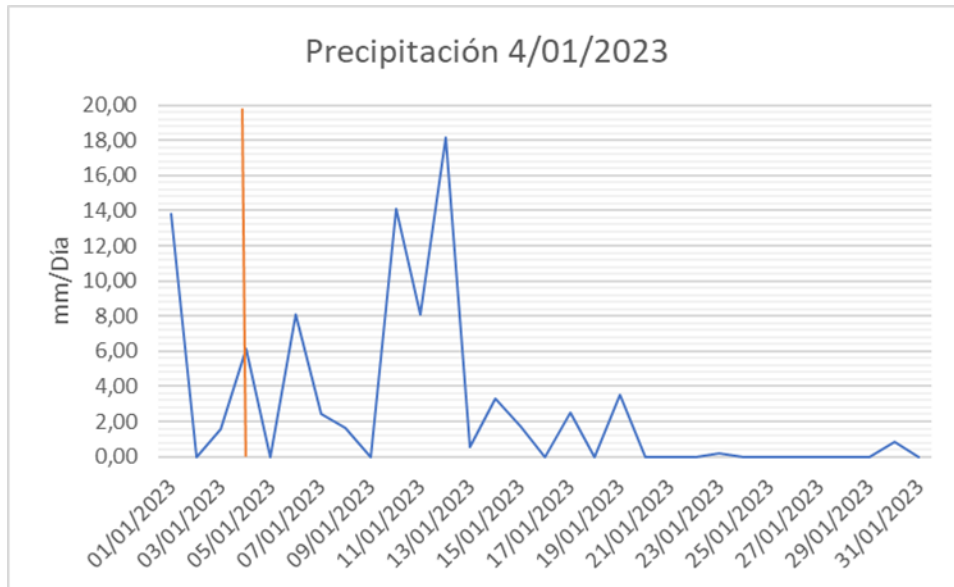


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Las mediciones de pH ratifican que se puede diferenciar las calidades del agua captada a distintas profundidades del embalse, un comportamiento igual al que se obtuvo en el muestreo del 20 de abril de 2022 donde las condiciones de operación, permiten que se note la diferencia en los parámetros medidos, de esta manera se podría predecir las características fisicoquímicas que lleva el recurso hídrico dirigido hacia la PTAP de acuerdo a la válvula que se abra para la captación.

Figura 34

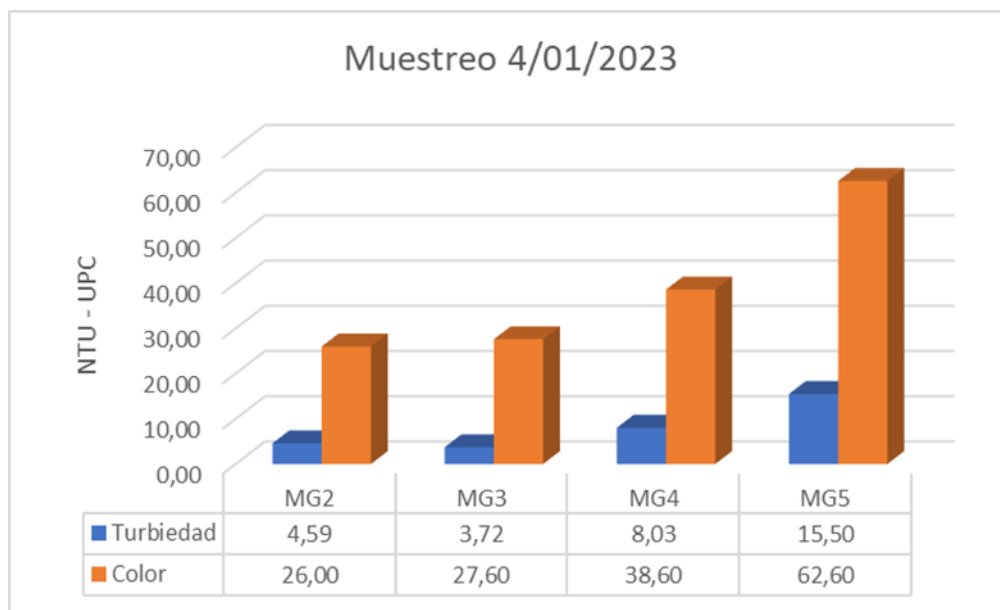
Lluvias 4/01/2023



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 35

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 4/01/2023

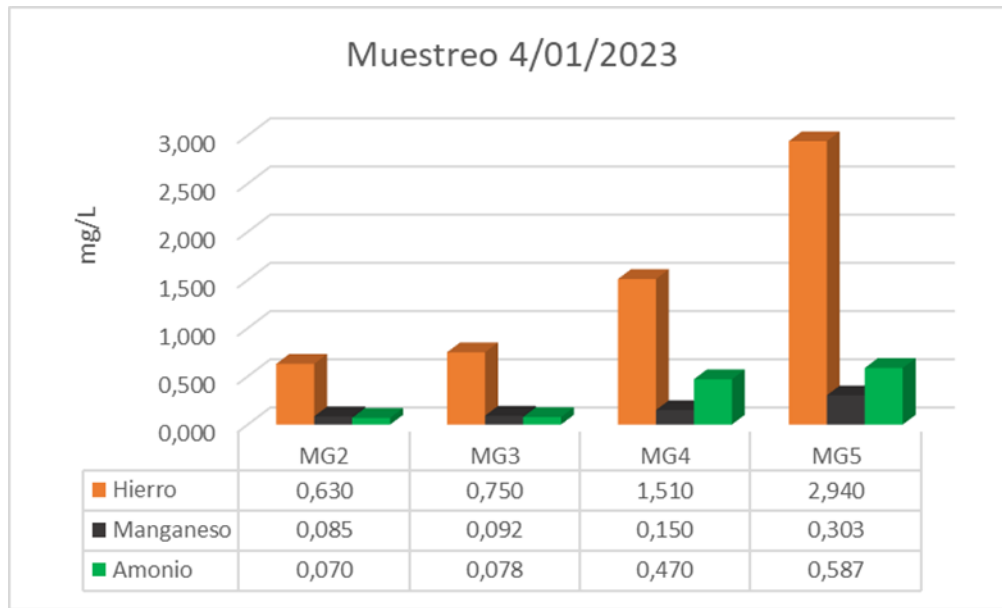


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

El nivel del embalse La Regadera también se controla mediante el embalse Chisacá, por ello, a pesar de presentarse precipitaciones en el mes de enero, sí se controla el nivel del embalse mediante el efluente de Chisacá, de esta manera no se ve afectado el comportamiento de las aguas de La Regadera, por eso en esta temporada se puede notar aun la diferencia del agua a las distintas profundidades.

Figura 36

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 4/01/2023

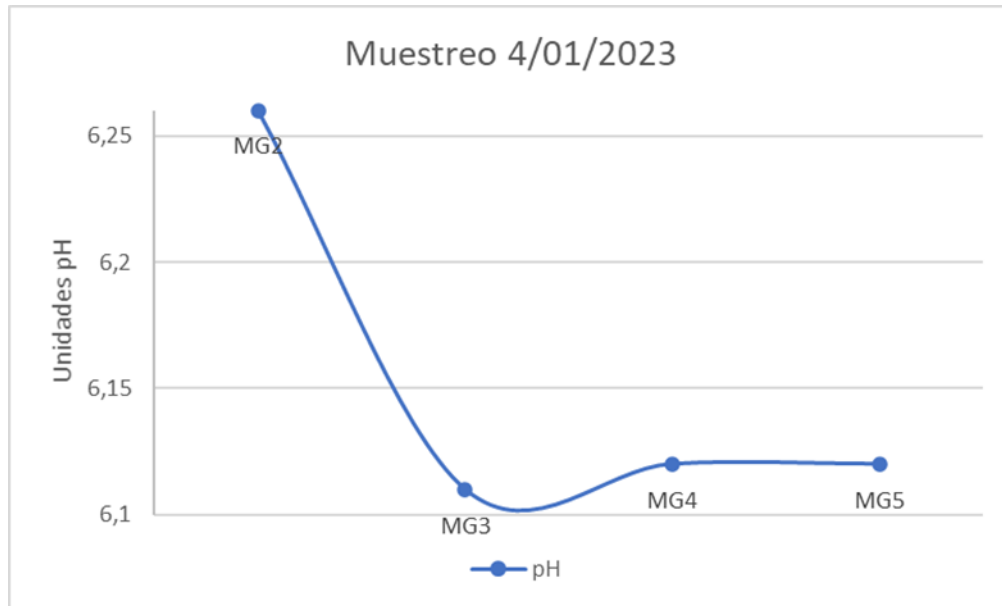


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Por lo mencionado anteriormente, sí se controla el efluente de Chisacá, se puede garantizar que el comportamiento de las aguas contenidas en el embalse La Regadera es “normal”, y esto se ve reflejado en el comportamiento proporcional entre la profundidad y la concentración de hierro, manganeso y amonio.

Figura 37

pH en la muestra tomada el 4/01/2023

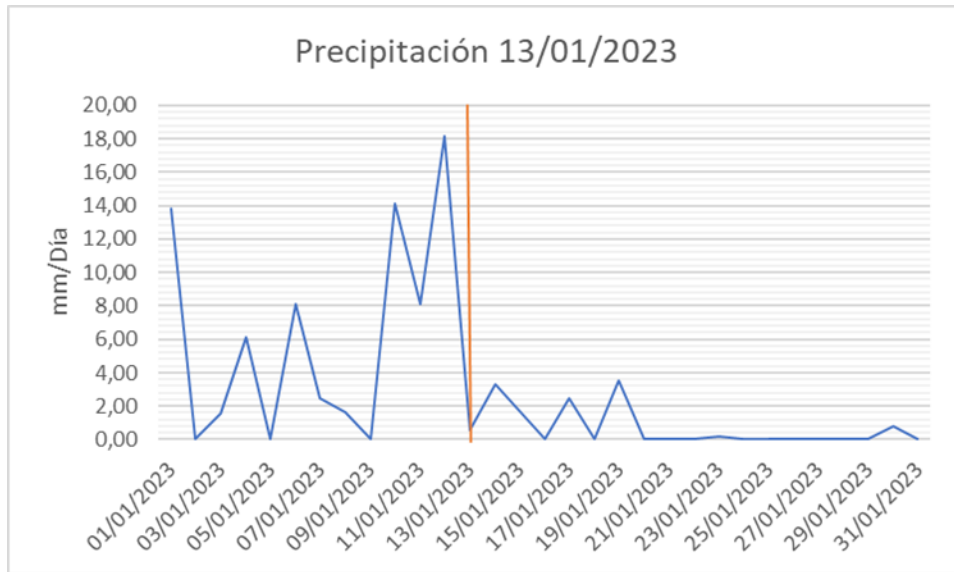


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

A pesar de las diferencias notables en los anteriores parámetros, el pH de las aguas es muy cercano entre cada una de ellas, aunque existan precipitaciones de lluvias, no generan una fuerza tan grande para homogeneizar las aguas en los demás parámetros, pero si en cuanto a pH.

Figura 38

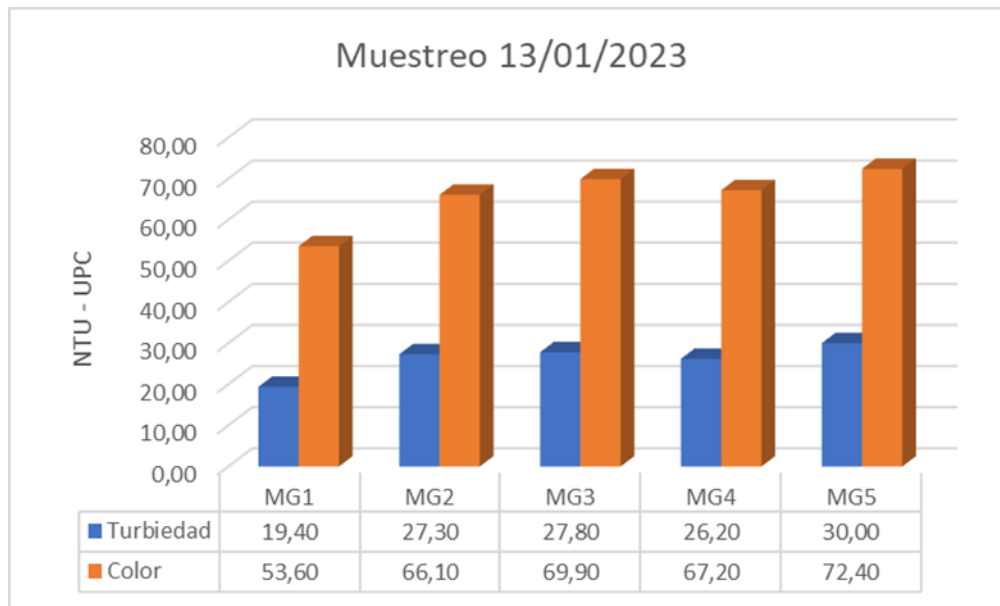
Lluvias 13/01/2023



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 39

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 13/01/2023

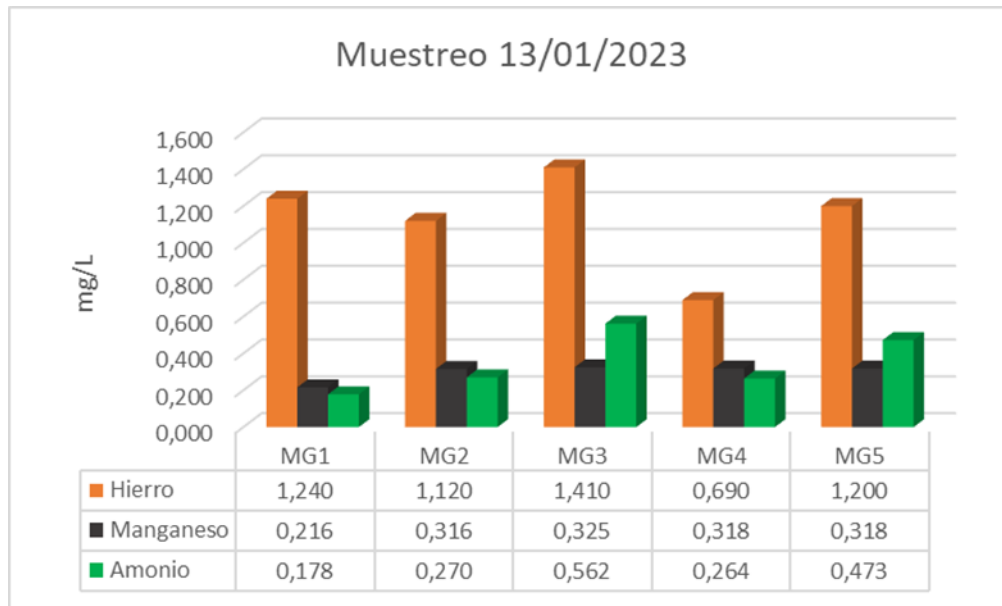


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Como se ha mencionado, el nivel del embalse se controla mediante la apertura de una represa ubicada más arriba, por esto y por las lluvias se puede captar nuevamente agua desde la MG1, y se observa como nuevamente se presenta una homogeneidad en el agua que contiene La Regadera, pues las mediciones de turbiedad y color son muy similares entre cada una de las profundidades de captación.

Figura 40

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 13/01/2023

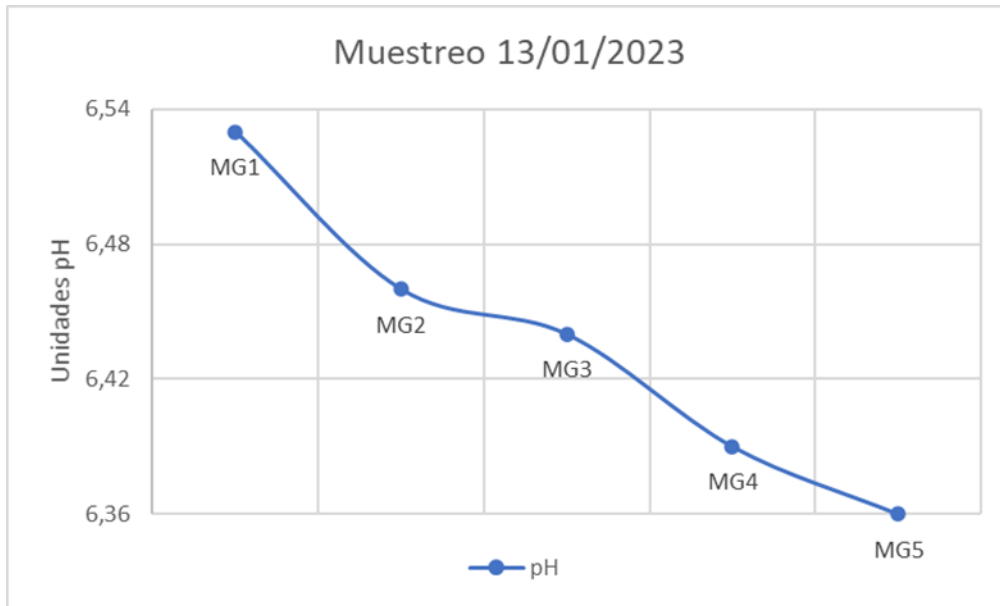


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado

Mediante la medición de hierro, manganeso y amonio para cada una de las muestras obtenidas se establece que las aguas se han homogeneizado para cada uno de los parámetros medidos, por ello no se puede establecer que existe una diferencia característica para las aguas del embalse.

Figura 41

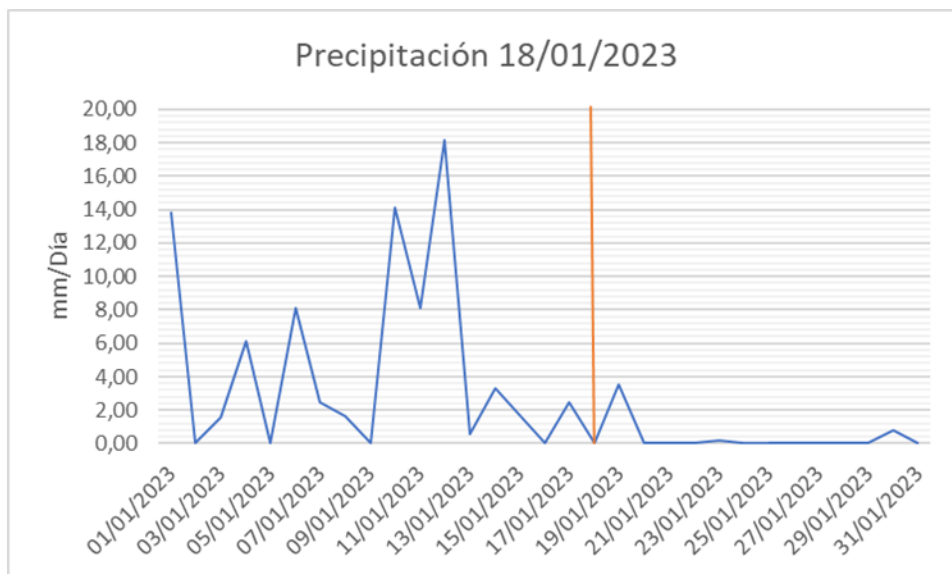
pH en la muestra tomada el 13/01/2023



Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Figura 42

Lluvias 18/01/2023



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 43

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 18/01/2023

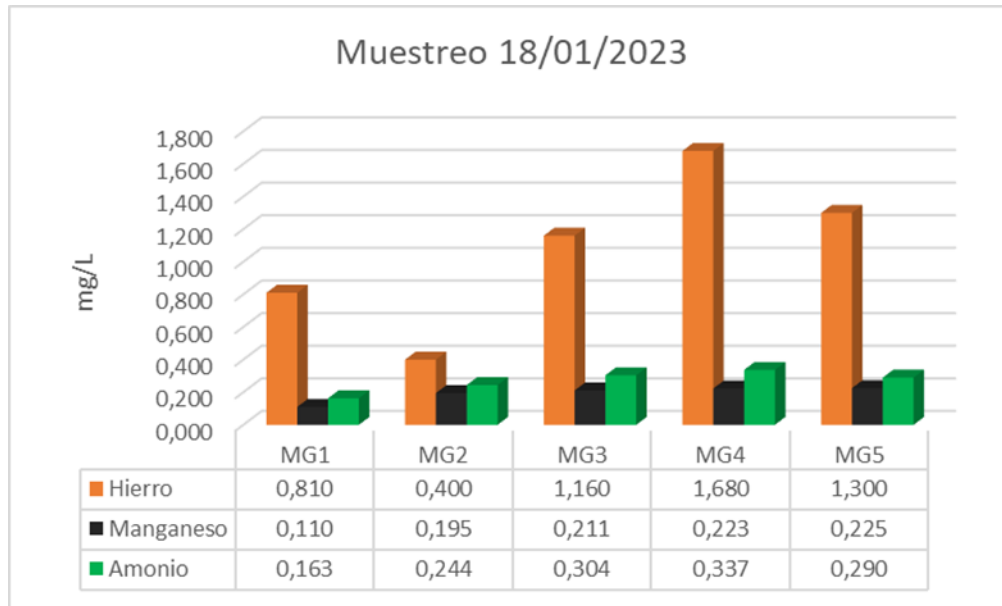


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

En este punto, se empieza a planear una operatividad específica del embalse, la cual consiste en reducir el nivel del embalse, para ello se deja de suministrar agua desde el embalse Chisacá, ocasionando que el contenido de agua empiece a disminuir mediante el rebose del sistema Morning Glory y con la apertura de la válvula de fondo hacia el túnel de descarga al río Tunjuelo, por esta operación, las diferencias en turbiedad y color, son muy pequeñas para las aguas a distintas profundidades del embalse.

Figura 44

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 18/01/2023

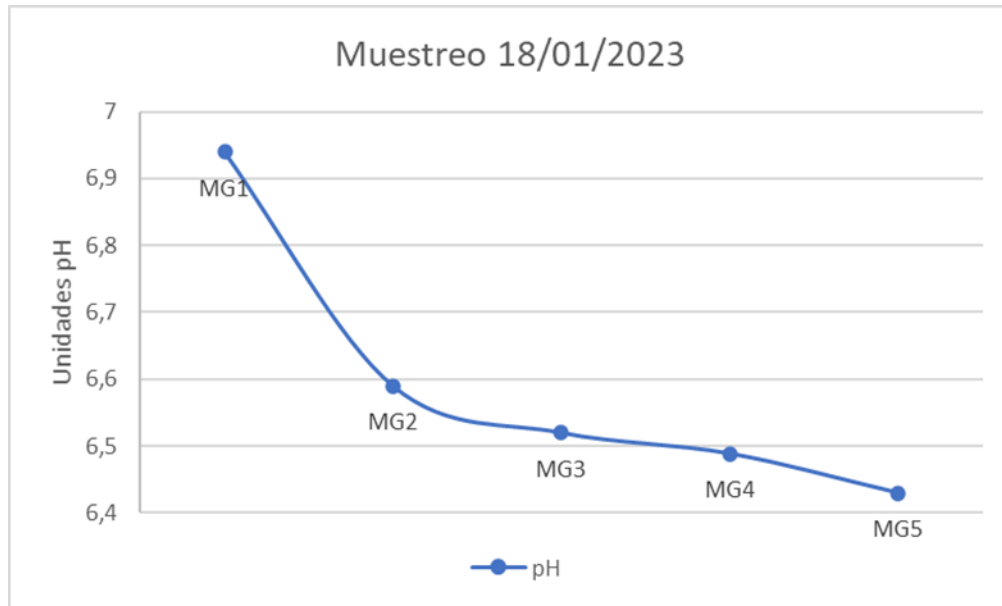


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Por el manejo que se le está dando al embalse, de igual manera se encuentra que las variaciones de los parámetros fisicoquímicos son muy leves entre cada una de las aguas obtenidas en el muestreo.

Figura 45

pH en la muestra tomada el 18/01/2023



Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Debido a las pocas lluvias presentadas, el agua superficial del embalse tiene un valor de pH mayor en comparación las otras 4 muestras.

Figura 46

Lluvias 9/02/2023



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

Figura 47

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 9/02/2023

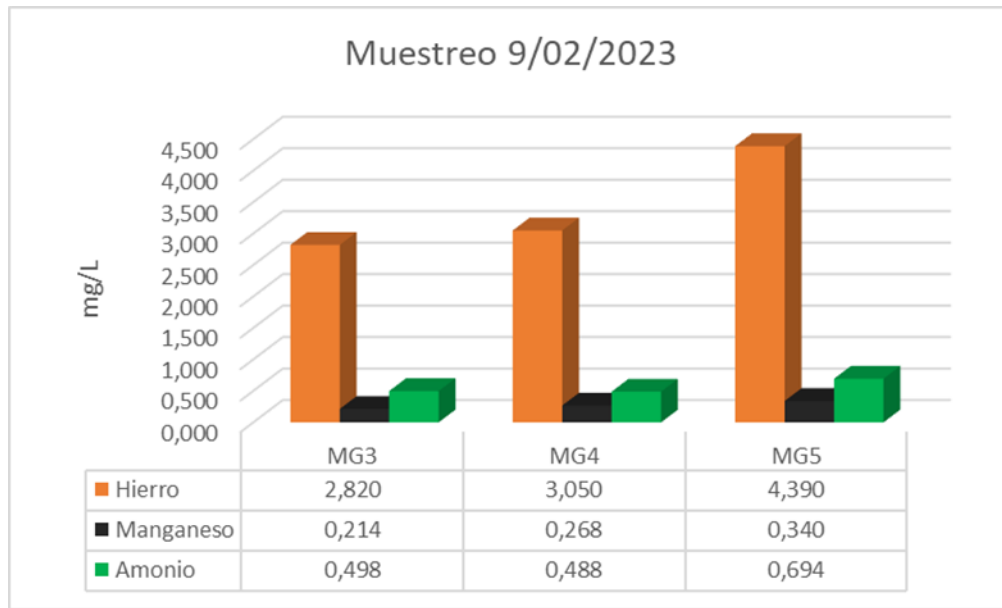


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

La razón de reducir el nivel del embalse La Regadera se hace con el fin de realizar cambios en las válvulas de captación MG1, MG2 y MG3, para ello se envía el agua al túnel de descarga; en este punto, el nivel más alto de captación se realiza mediante la MG3, al tener una menor de agua contenida en el embalse, las características medidas son muy similares a pesar de la profundidad de captación.

Figura 48

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 9/02/2023

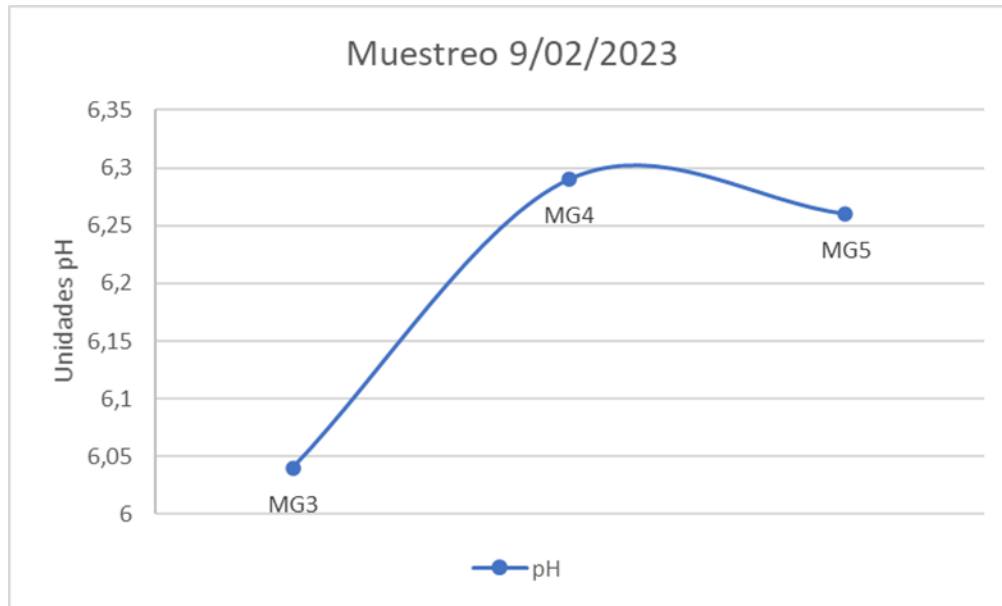


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Como se menciona anteriormente, los parámetros medidos se asemejan mucho entre sí en cuanto a hierro, manganeso y amonio; y la ausencia de precipitaciones significativas se puede reducir el nivel del embalse adecuadamente.

Figura 49

pH en la muestra tomada el 9/02/2023



Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Figura 50

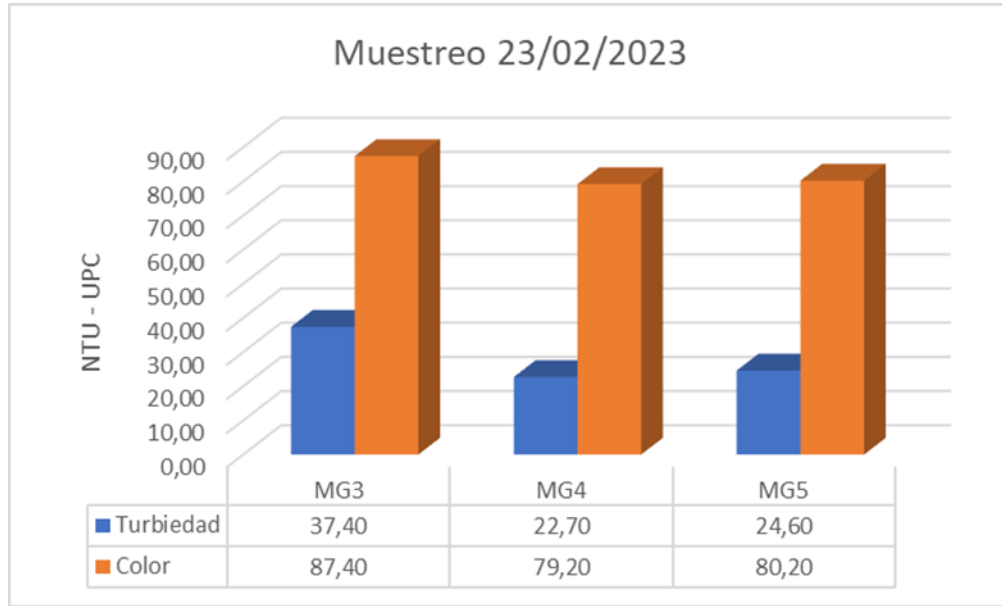
Lluvias 23/02/2023



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 51

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 23/02/2023

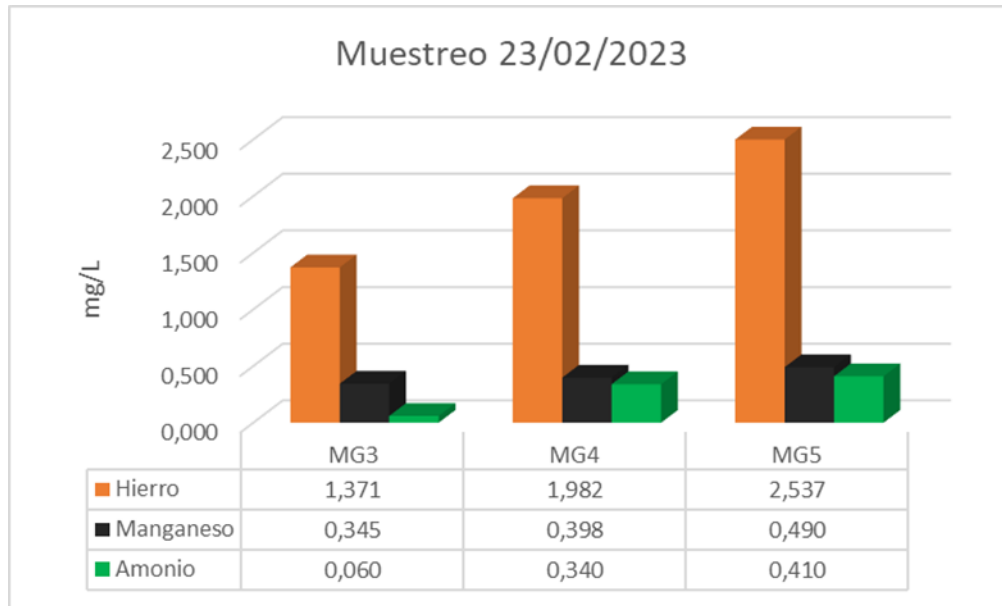


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Las características que se encuentran en el agua del embalse son similares a las presentadas en el muestreo anterior, las calidades del agua que salen por las válvulas se asemejan y aun se tiene un nivel de captación máximo al nivel de la MG3.

Figura 52

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 23/02/2023

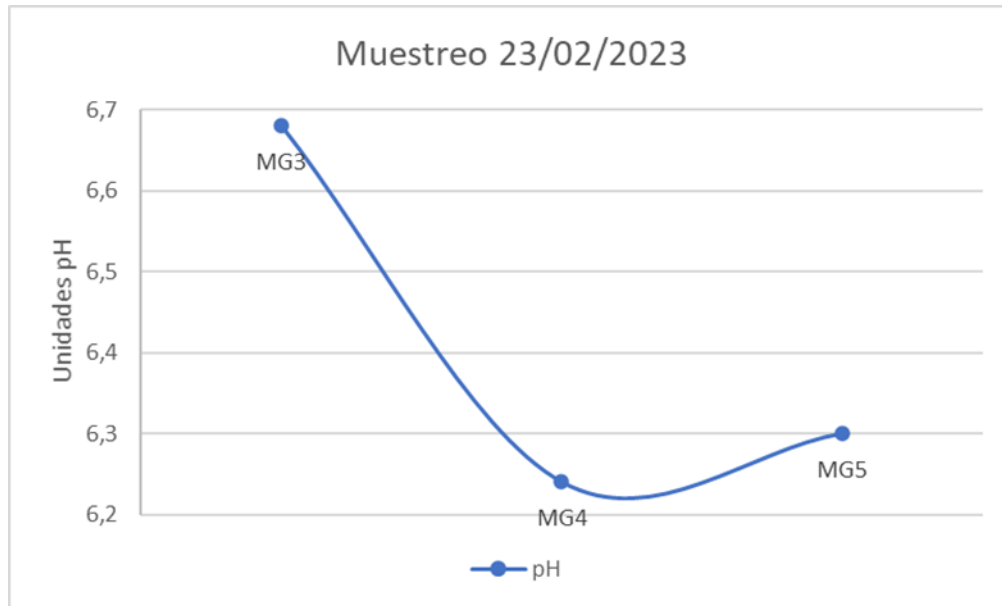


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

De igual manera se comportan el hierro, manganeso y amonio, tienen valores de medición semejantes y se puede decir que, gracias al proceso de reducir el nivel del embalse, se evidencia una “limpieza” en cuanto a manganeso y amonio al observar concentraciones menores de dichas especies en el agua analizada.

Figura 53

pH en la muestra tomada el 23/02/2023

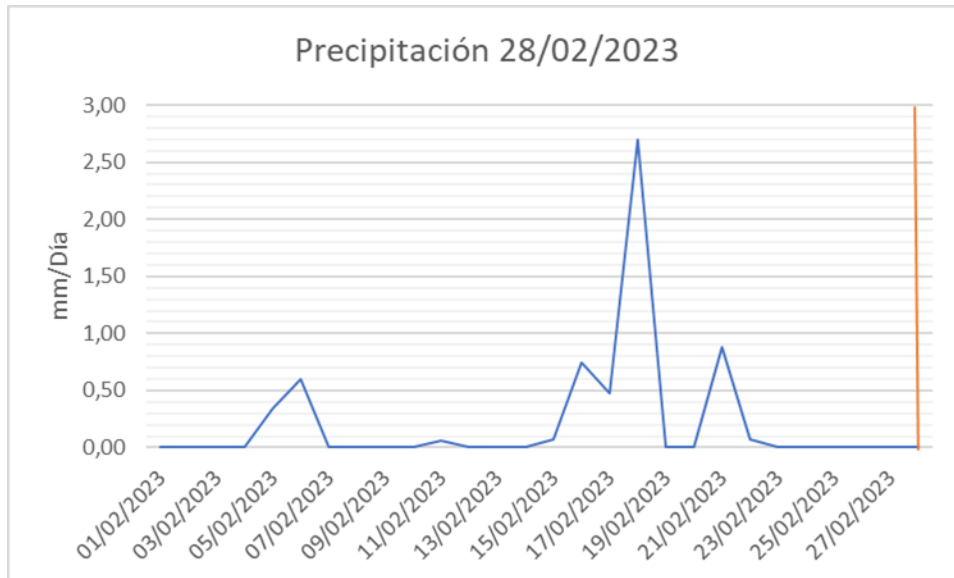


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

A causa de las lluvias casi inexistentes en la zona, el pH del agua superficial es mayor en comparación a la captada por las MG4 y MG5.

Figura 54

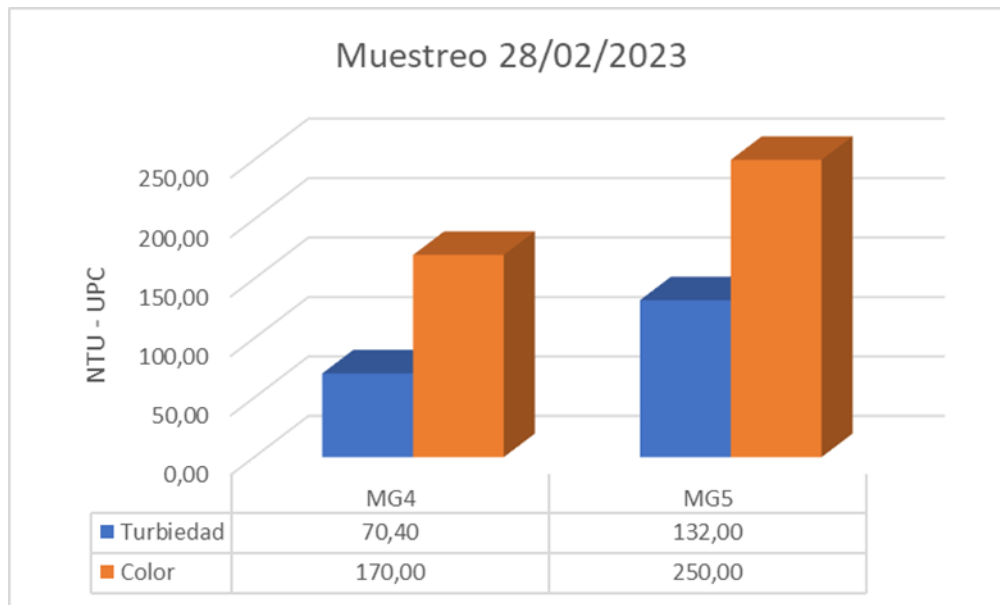
Lluvias 28/02/2023



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 55

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 28/02/2023

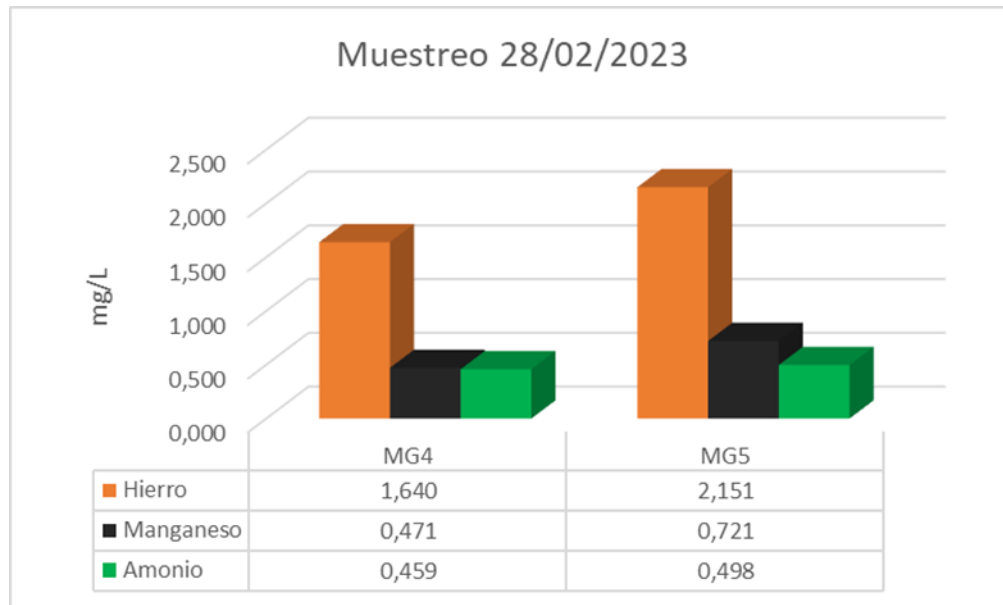


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

En este punto, ya se logró el objetivo de desocupar el embalse al 15% para realizar las operaciones de cambio de válvulas de captación para la MG1, MG2 y MG3; al solo disponer del 15% del nivel del embalse, estas aguas tienen una alta turbiedad y color debido a la cercanía con el fondo de la represa,

Figura 56

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 28/02/2023

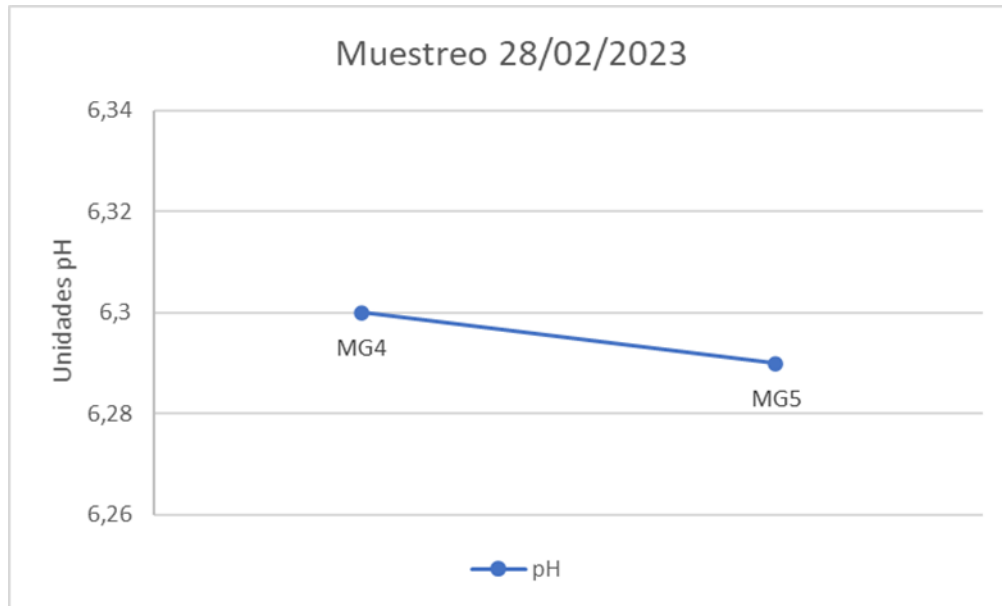


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Por lo mencionado anteriormente, el agua captada de la MG4 y la MG5 son muy similares debido a su cercanía entre sí; así mismo la cercanía de estas aguas con el fondo del embalse se refleja en las concentraciones de hierro, pues allí se encuentran precipitados los óxidos de hierro además de ser un suelo rico en dicho mineral, se disuelven en dichas aguas.

Figura 57

pH en la muestra tomada el 28/02/2023

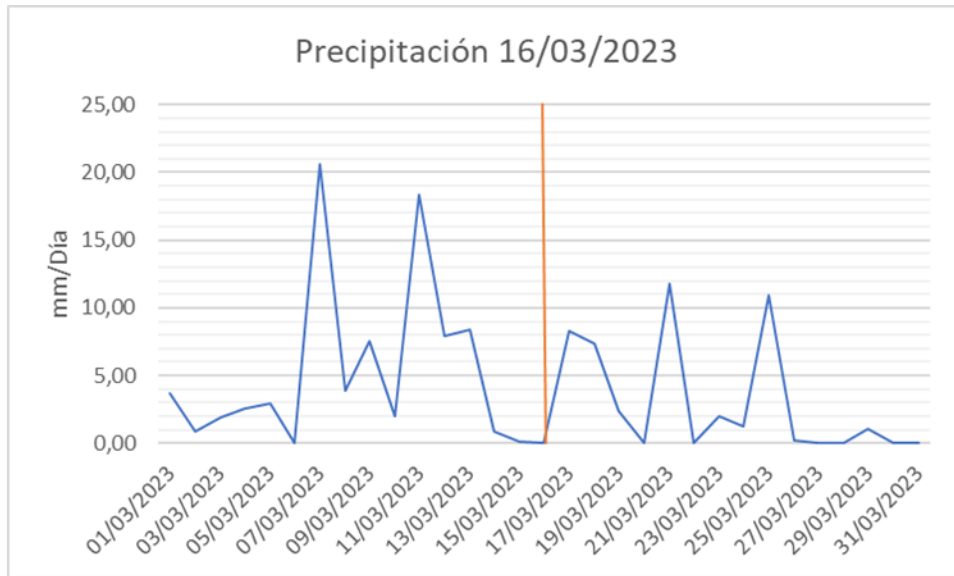


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Así como se muestra en las anteriores graficas la similitud de los parámetros medidos, la medición del pH indica la semejanza entre las aguas restantes en el embalse.

Figura 58

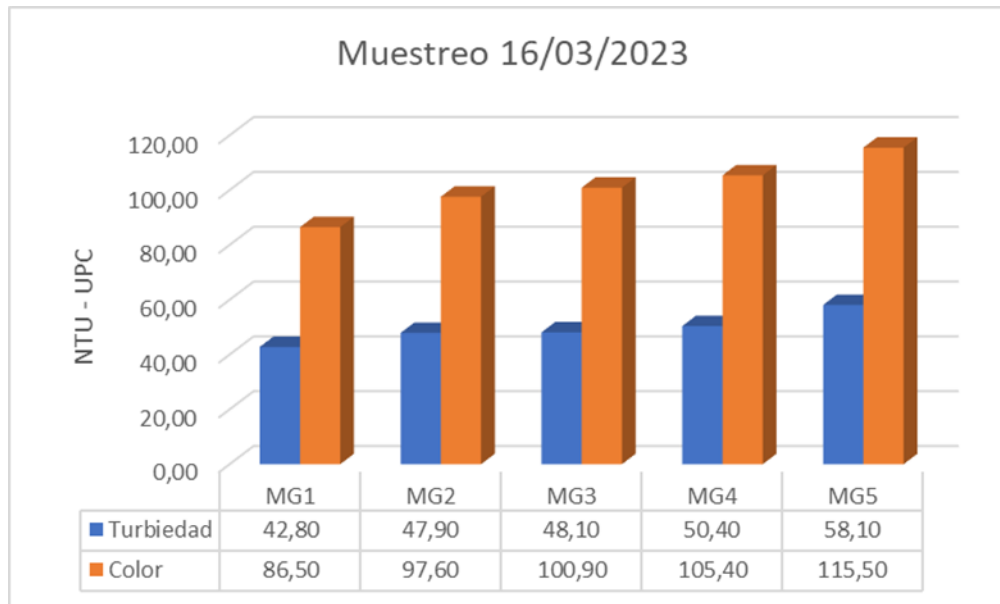
Lluvias 16/03/2023



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 59

Turbiedad y color aparente en la muestra tomada el 16/03/2023

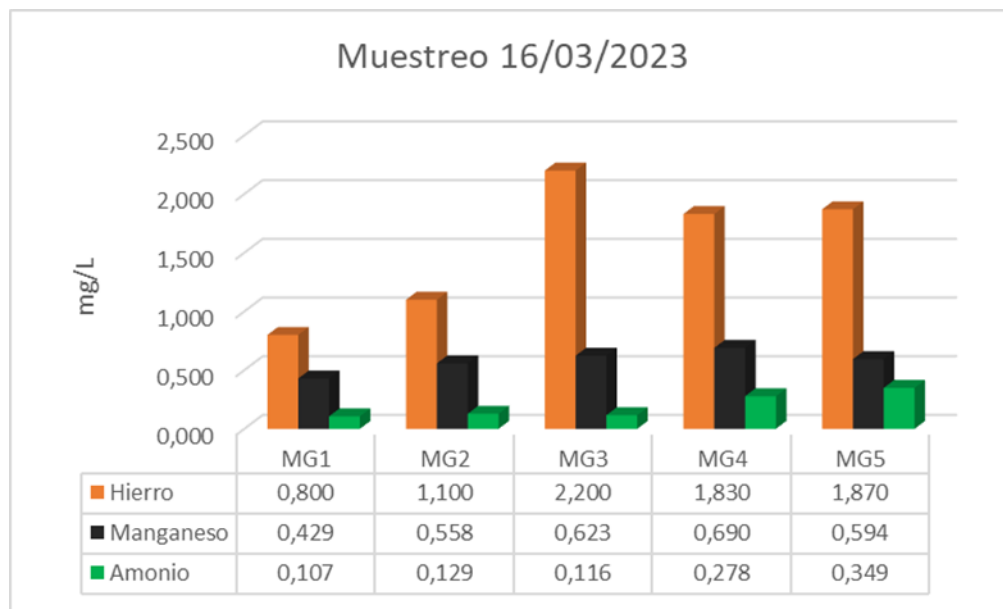


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Para la fecha en la que se realiza el muestreo, ya se han realizado los trabajos de cambio de válvulas de captación; por ello encontramos que el embalse La Regadera se encuentra nuevamente en su máxima capacidad de almacenamiento, permitiendo la captación del recurso hídrico por cada una de las válvulas dispuestas para ello, como se ha mencionado anteriormente, el nivel del embalse se recupera mediante el flujo proveniente del embalse Chisacá, por ello a pesar de que los parámetros medidos son semejante, empiezan a comportarse de la manera “normal” para notar las diferentes calidades de agua que se presentan a las distintas profundidades del embalse.

Figura 60

Hierro, manganeso y amonio en la muestra tomada el 16/03/2023

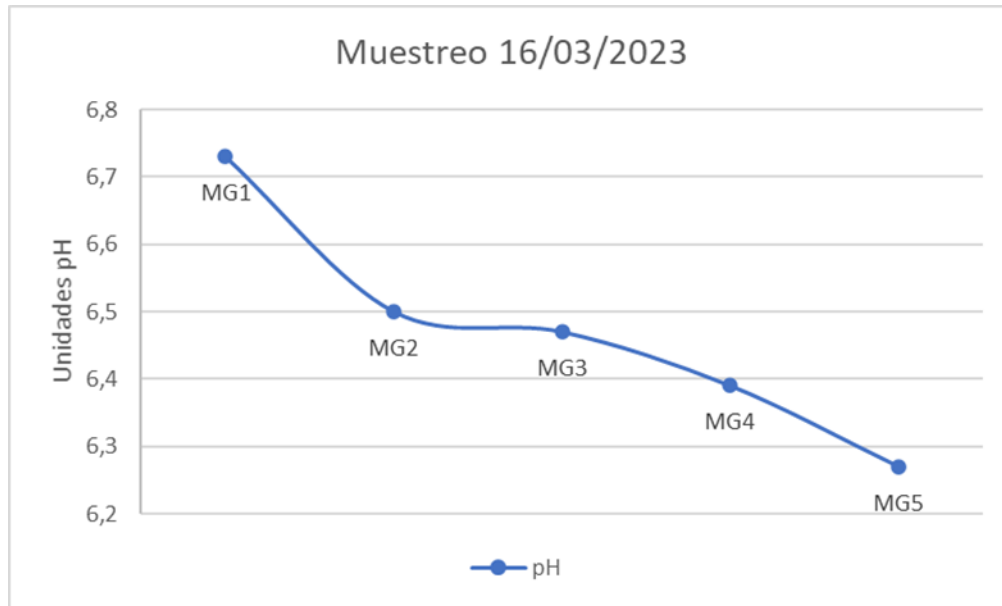


Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Al igual que con las mediciones de turbiedad y color aparente, para la medición de hierro, manganeso y amonio, se obtienen concentraciones muy similares entre sí; en cuanto a manganeso y amonio se empieza a notar la tendencia ya descrita anteriormente, aumentan sus valores a medida que aumenta la profundidad de captación. Se puede decir que el proceso de “vaciar” el embalse, ha ocasionado una limpieza, mostrando unas menores concentraciones de manganeso y amonio en comparación al muestreo realizado el 20 de abril de 2022.

Figura 61

pH en la muestra tomada el 16/03/2023



Nota. Datos brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

En cuanto a medidas de pH, se marca también la tendencia “normal”, obteniendo mayores valores de pH más cercanos a la superficie.

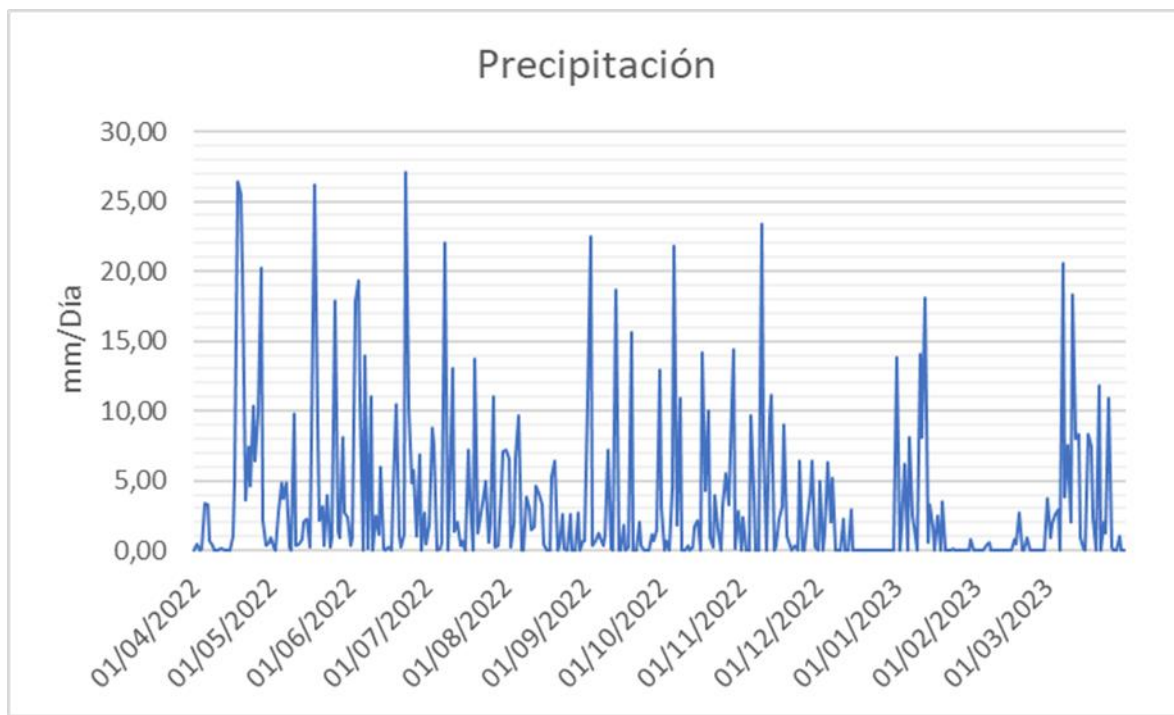
A continuación, se muestra la Precipitación acumulada por día durante el periodo de muestreo en el embalse La Regadera, de esta manera se puede explicar el comportamiento de algunos de los parámetros fisicoquímicos en los distintos muestreos realizados mediante el sistema Morning Glory para caracterizar las aguas captadas por cada una de las válvulas.

El máximo valor de precipitación se encuentra el 23 de junio del 2022, con un valor de 27,09 mm/Día, mediante este valor, se puede decir que los meses con valores de precipitación a dicho valor, se pueden considerar como temporadas de lluvias y sequía en la zona.

En este caso se establecen dos temporadas de lluvias, la primera que va desde mediados de abril hasta principios de julio; la segunda temporada ocurrió a principios de septiembre y finalizó a principios de noviembre. Así mismo se establecen dos temporadas de sequía, la primera ocurre a mediados de julio y va hasta finales de agosto; la segunda época de sequía se presenta a mediados de noviembre hasta marzo 2023.

Figura 62

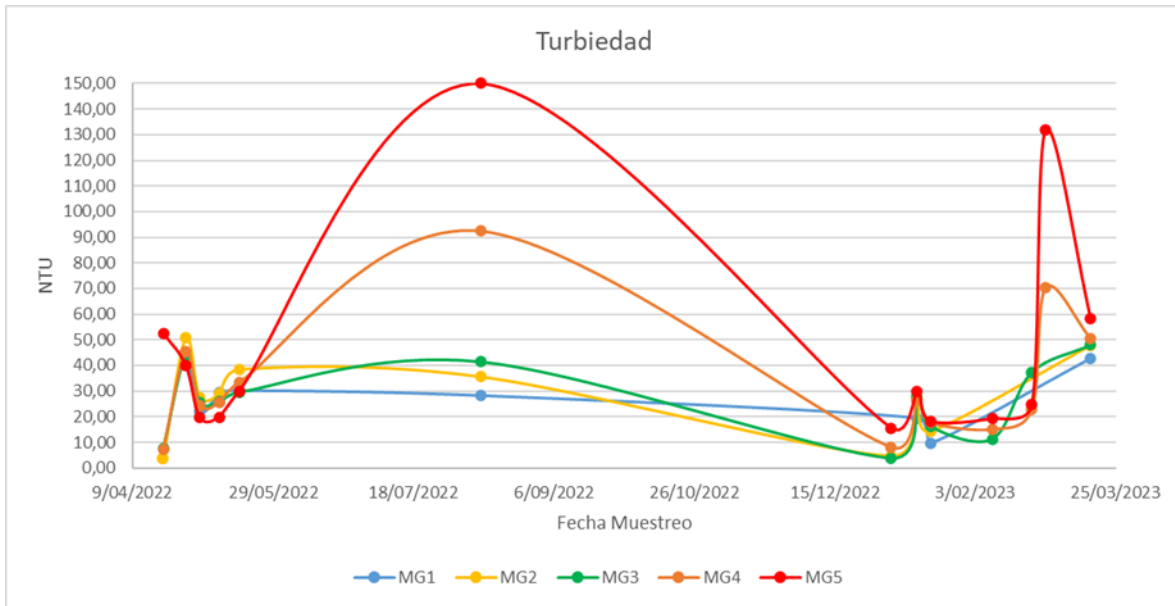
Lluvias desde abril 2022 hasta marzo 2023



Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Figura 63

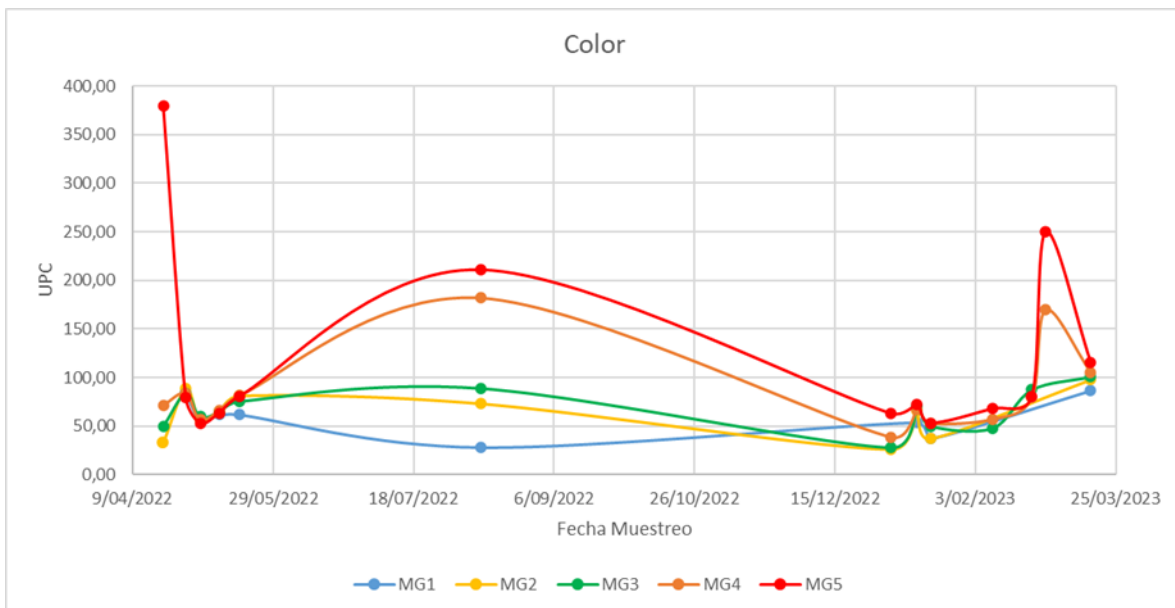
Turbiedad presentada entre 20/04/2022 a 16/03/2023



Nota. Datos obtenidos por los autores y brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Figura 64

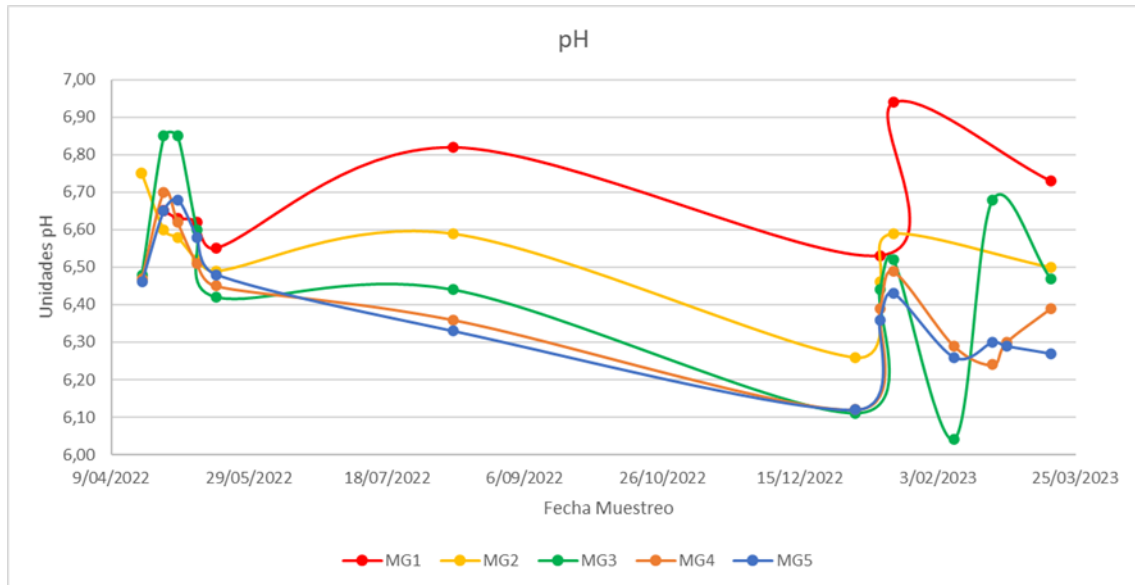
Color aparente presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023



Nota. Datos obtenidos por los autores y brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Figura 65

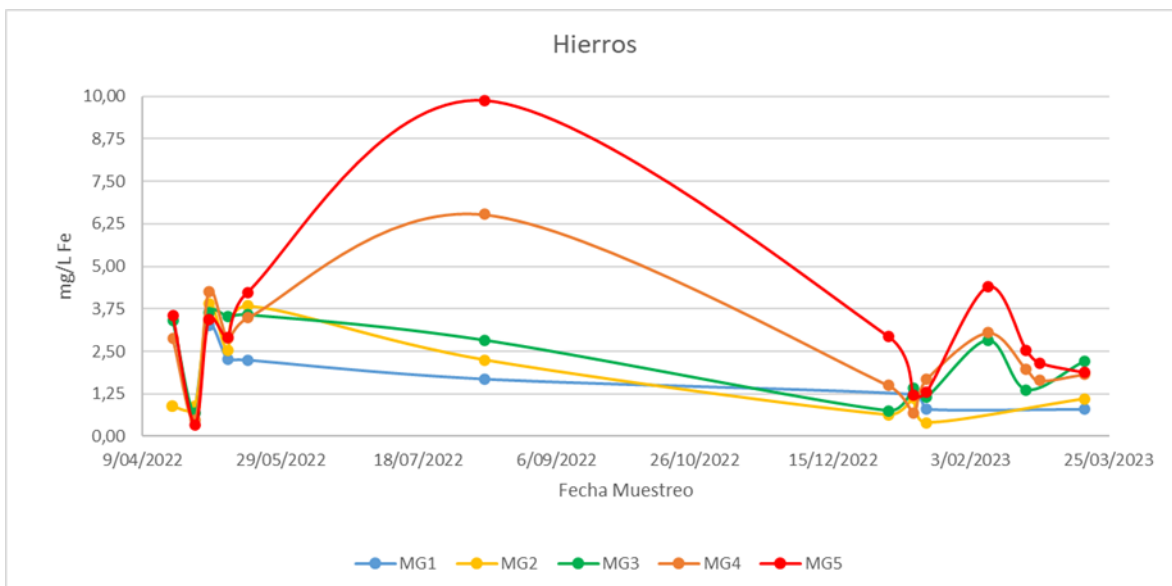
pH presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023



Nota. Datos obtenidos por los autores y brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Figura 66

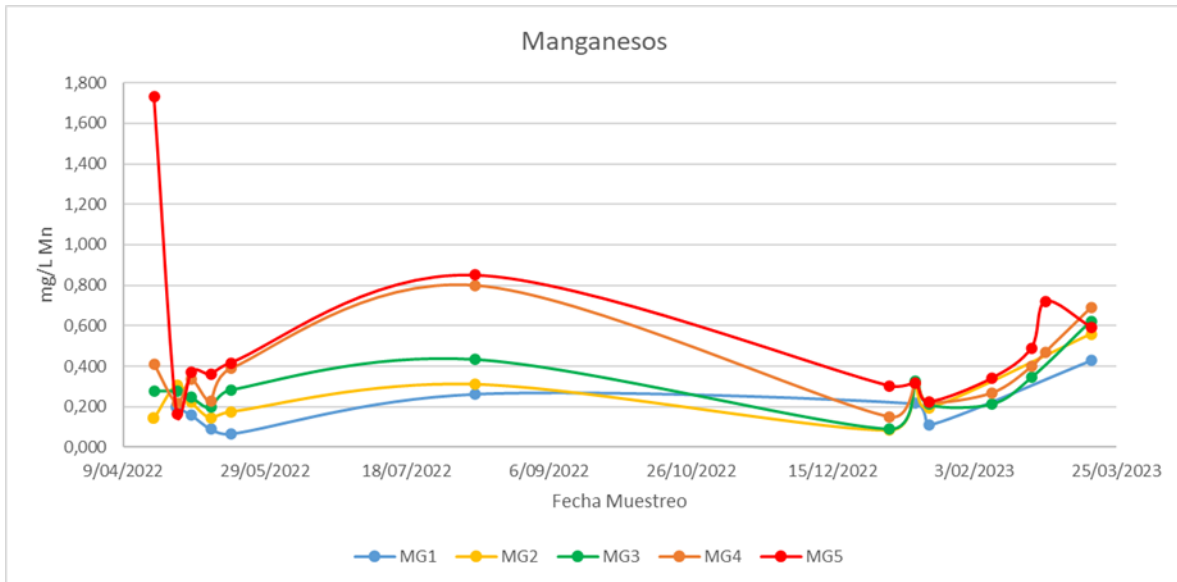
Hierro presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023



Nota. Datos obtenidos por los autores y brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Figura 67

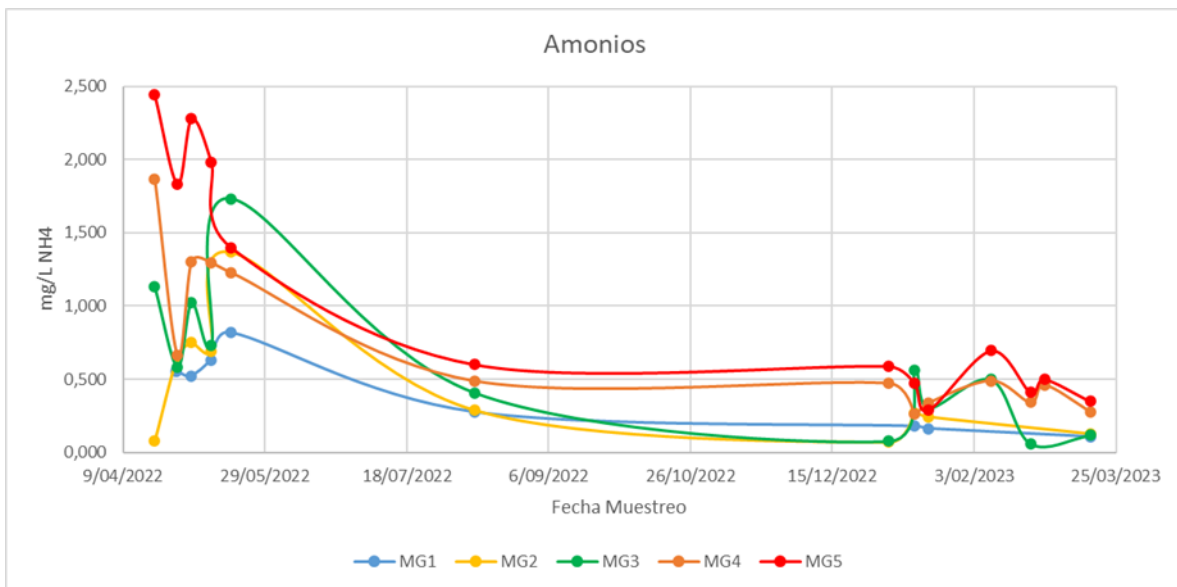
Manganeso presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023



Nota. Datos obtenidos por los autores y brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

Figura 68

Amonio presentado entre 20/04/2022 a 16/03/2023



Nota. Datos obtenidos por los autores y brindados por el laboratorio de calidad de la PTAP El Dorado.

3.2 Comportamiento de los vientos

Anteriormente se analizaron las lluvias junto a las caracterizaciones de las aguas, en donde las precipitaciones se toman como un factor externo al cual se relaciona el comportamiento de las aguas del embalse. Para dar continuidad a los factores que afectan las características fisicoquímicas del recurso hídrico y así dar cumplimiento al segundo objetivo específico, se busca relacionar la velocidad y dirección del viento al movimiento que puedan generar en el agua, de esta manera se analizan 3 factores que pueden ocasionar el efecto de homogeneidad al interior de la represa,

Al analizar los datos de velocidad y dirección del viento, se logra establecer que, en el periodo comprendido entre abril del 2022 hasta marzo del 2023, se presentaron vientos con un valor máximo de 11,3 Km/h; en cuanto a la dirección del viento, se obtuvieron 39.927 registros de dirección del viento, de los cuales 31.144 indicaban un viento con dirección al sureste.

Tabla 4

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 20/04/2022

| 20/04/2022 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 66 |
| SE | 374 |
| NW | 177 |
| SW | 55 |

| | |
|-------------------------|-----|
| Velocidad Máxima | 4,3 |
| Velocidad Mínima | 0 |

*Nota. Departamento de hidrología.
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.*

Tabla 5

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 28/04/2022

| 28/04/2022 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 72 |
| SE | 460 |
| NW | 90 |
| SW | 54 |

| | |
|-------------------------|-----|
| Velocidad Máxima | 5,5 |
| Velocidad Mínima | 0 |

Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

Tabla 6

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 17/05/2022

| 17/05/2022 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 86 |
| SE | 389 |
| NW | 78 |
| SW | 41 |

| | |
|-------------------------|------|
| Velocidad Máxima | 0,18 |
| Velocidad Mínima | 0 |

Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Tabla 7

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 11/08/2023

| 11/08/2022 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 41 |
| SE | 232 |
| NW | 41 |
| SW | 20 |

| | |
|-------------------------|------|
| Velocidad Máxima | 0,08 |
| Velocidad Mínima | 0 |

Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Tabla 8

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 04/01/2023

| 4/01/2023 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 31 |
| SE | 205 |
| NW | 278 |
| SW | 56 |

| | |
|-------------------------|-----|
| Velocidad Máxima | 5,7 |
| Velocidad Mínima | 0 |

Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

Tabla 9

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 13/01/2023

| 13/01/2023 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 68 |
| SE | 455 |
| NW | 28 |
| SW | 50 |

| | |
|-------------------------|-----|
| Velocidad Máxima | 6,5 |
| Velocidad Mínima | 0 |

Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Tabla 10

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 18/01/2023

| 18/01/2023 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 50 |
| SE | 468 |
| NW | 51 |
| SW | 30 |

| | |
|-------------------------|-----|
| Velocidad Máxima | 8,4 |
| Velocidad Mínima | 0 |

Nota. Departamento de hidrología. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Tabla 11

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 09/02/2023

| 9/02/2023 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 33 |
| SE | 511 |
| NW | 35 |
| SW | 56 |

| | |
|-------------------------|-----|
| Velocidad Máxima | 7,7 |
| Velocidad Mínima | 0 |

*Nota. Departamento de hidrología.
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.*

Tabla 12

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 23/02/2023

| 23/02/2023 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 21 |
| SE | 574 |
| NW | 28 |
| SW | 45 |

| | |
|-------------------------|-----|
| Velocidad Máxima | 8,6 |
| Velocidad Mínima | 0 |

*Nota. Departamento de hidrología.
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.*

Tabla 13

Registro de dirección y velocidad del viento para el muestreo del 16/03/2023

| 16/03/2023 | |
|-------------|---------|
| Orientación | Resumen |
| NE | 99 |
| SE | 255 |
| NW | 183 |
| SW | 118 |

| | |
|-------------------------|-----|
| Velocidad Máxima | 5,3 |
| Velocidad Mínima | 0 |

*Nota. Departamento de hidrología.
Empresa de Acueducto y Alcantarillado
de Bogotá.*

Como se muestra en las tablas anteriores, durante los días de muestreo no se presentaron vientos con características capaces de generar movimientos en las aguas del embalse, esto teniendo en cuenta la denominación por el número de Beaufort.

4. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

Teniendo en cuenta que la razón que da inicio a este trabajo de grado es la emergencia presentada en noviembre del 2020, donde las aguas que llegaban a la PTAP El Dorado tenían características nunca vistas por el personal de la planta, lo que se quiere lograr mediante este capítulo es el desarrollo del tercer objetivo específico planteado, para esto se tienen en cuenta los parámetros que en su momento representaron un problema para el proceso de potabilización y que se caracterizaron en el capítulo anterior; se realizará una revisión bibliográfica en busca de alternativas de tratamiento para el hierro, el manganeso y el amonio, obteniendo así ciertos insumos específicos según la técnica empleada.

Para el desarrollo del capítulo se realizó una revisión sistemática de diversas fuentes de información, dedicadas al estudio y desarrollo de alternativas de tratamiento de remoción de los parámetros a tratar, en donde se tuvo en cuenta búsquedas de reportes técnicos, patentes, revistas científicas, tesis y normas.

En cuanto a la estrategia de búsqueda, esta se realizó en primer lugar por medio del repositorio Lumieres de la Universidad de América, teniendo en cuenta los temas mencionados, posteriormente se realizó la búsqueda por medio de la biblioteca virtual, según la literatura científica reportada en las diferentes colecciones digitales como Science Direct, Mendeley, Springer Link, Knovel, Scielo, Access Engineering y Scopus, esta búsqueda se realizó sin límite de fecha, tanto en inglés como en español, por medio de conceptos clave, términos relacionados y haciendo uso de los operadores booleanos. De igual forma se hizo uso del buscador Google Scholar con el fin de extraer la mayor información de las diversas fuentes, sin límite de fecha y en ambos idiomas. Por último, se analizaron así mismo, las referencias bibliográficas de las fuentes seleccionadas con el fin de recuperar información potencialmente incluíble para la revisión bibliográfica.

4.1 Remoción de hierro y manganeso

Frecuentemente el hierro y el manganeso hacen presencia en el agua debido a que son dos elementos comunes en los suelos; ya sea por arrastre o solubilidad, los afluentes adquieren la presencia de estos minerales y a pesar de no representar un peligro para la salud; la problemática de que estos se encuentren en el agua potable se centra en dar características indeseables para el consumo humano, afectar las redes de distribución y estropear artículos domésticos.

La presencia de estos dos minerales ocasiona que el agua tome un sabor metálico, generar olores en los tanques de almacenamiento y dar una coloración café-rojiza o café-negra; esta última causa manchas en los artículos domésticos, ropa, accesorios de plomería y concreto.

Los depósitos de hierro y manganeso se acumulan en los tubos de cañerías, tanques de presión, calentadores de agua y equipo ablandador de agua. Estos depósitos restringen el flujo del agua y reducen la presión del agua. Más energía se requiere para bombear agua a través de tubos tapados y para calentar agua si los rodos de los calentadores están cubiertos con depósitos minerales. Esto aumenta los costos de la energía y el agua. El agua contaminada con hierro y manganeso usualmente contiene bacterias de hierro o manganeso. Estas bacterias se alimentan de los minerales que hay en el agua. No causan problemas de salud, pero sí forman una baba rojiza-café (hierro) o café-negra (manganeso) en los tanques de los inodoros y pueden tapar los sistemas de agua [28].

A continuación, se muestran distintos métodos para la remoción de hierro y manganeso, en cada uno de ellos se emplean diferentes insumos para lograr la remoción de los ya mencionados.

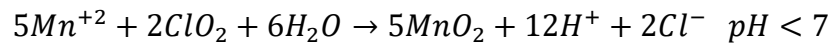
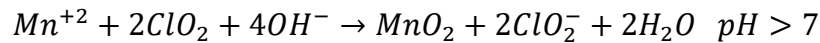
4.1.1 Procesos de oxidación, precipitación y filtración

Este método consiste normalmente en adicionar un compuesto químico teniendo en cuenta las condiciones del proceso para que se pueda efectuar la reacción de oxidación, básicamente se genera un precipitado al llevar la materia solubilizada en el agua a un estado insoluble para retirarlo posteriormente mediante filtración.

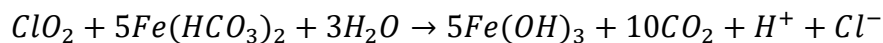
Los oxidantes empleados generalmente incluyen hipoclorito, permanganato de potasio, peróxido de hidrogeno, cloro, ozono, dióxido de cloro entre otros; el tiempo de residencia es un factor importante para garantizar una reacción química completa, para ello se requiere de un lugar donde se pueda dosificar apropiadamente el compuesto oxidante seleccionado y así mismo ajustar el pH requerido para que se dé la reacción y genere el precipitado de material oxidado.

4.1.1.a Dióxido de cloro. El dióxido de cloro (ClO₂) se emplea como desinfectante y oxidante en el proceso de potabilización de agua. El dióxido de cloro forma precipitados con especies de hierro y manganeso que se encuentran solubles en el agua y que pueden retirarse por procesos como la sedimentación y filtración. La pre-oxidación con dióxido de cloro es eficaz para la eliminación de hierro y manganeso y mejora la coagulación y la sedimentación, lo que resulta en mejores tiempos de funcionamiento del filtro [29].

El ClO₂ oxida rápidamente el manganeso a dióxido de manganeso, este producto de reacción es insoluble en agua por lo tanto genera un precipitado que se puede filtrar antes de que el agua salga de la planta de tratamiento. Por encima de pH 7 se requiere un promedio de 2,45 mg/L de dióxido de cloro para eliminar 1 mg/L de manganeso. Los mejores resultados se obtienen cuando el pH es superior a 7 [30].



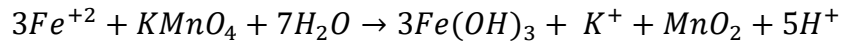
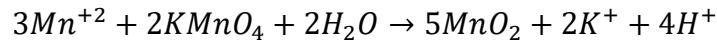
El dióxido de cloro oxida rápidamente el hierro (II) a hierro (III), que precipita como hidróxidos de hierro. Por encima de pH 5, se requiere un promedio de 1,2 mg/L de dióxido de cloro para eliminar 1,0 mg/L de hierro. La reacción se ve favorecida a pH neutros a alcalinos. Por encima de pH 5, la forma férrica resultante de hierro es 99% extraíble por un filtro de 0,45 micras después de cinco minutos [31].



Se ha informado que el dióxido de cloro es capaz de oxidar el hierro que se encuentra unido orgánicamente, en estos casos el cloro no es reactivo con esta clase de hierro con lo cual no se podían controlar las bacterias del hierro; para un caso como este se ha utilizado el dióxido de cloro para controlar estas biopelículas eliminando el hierro unido de manera orgánica y así, mientras el hierro se está oxidando, las bacterias quedan expuestas al desinfectante [31].

El tratamiento con dióxido de cloro se puede implementar fácilmente en la planta de tratamiento, mediante un dosificador luego de la etapa de pre-cal, se establece este punto de adición debido a que el pH del agua aumentará, beneficiando las reacciones de oxidación y garantizando que los óxidos formados se puedan retirar mediante la sedimentación y la filtración.

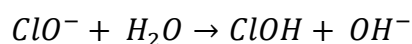
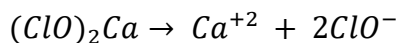
4.1.1.b Permanganato de potasio. El permanganato de potasio se considera un oxidante más fuerte y tiene muchas ventajas sobre otros oxidantes. La química de oxidación del hierro y el manganeso se puede describir de la siguiente manera: [32].



Para oxidar 1 mg de hierro y un mg de manganeso, aproximadamente 0,94 mg y 1,92 mg se requieren de permanganato de potasio respectivamente. Cuando el hierro y el manganeso existen en altas concentraciones, el filtro funciona menos de 24 horas, por lo que se necesita un paso de aclaración antes de la filtración para disminuir el tiempo en los filtros de antracita. Entonces, el método de tratamiento incluiría la floculación, sedimentación y Etapas de filtración [32].

En caso de implementar el permanganato de potasio como agente oxidante, su aplicación se debe realizar en la entrada, pues seguido se encuentra una cascada artificial la cual se usa como método de aireación para el agua que se va a potabilizar; aplicando el permanganato de potasio al inicio del proceso permite que exista un tiempo de residencia suficiente para oxidar el hierro y el manganeso contenido en el agua y así retirarlo mediante la etapa de sedimentación y filtración.

4.1.1.c Cloración. El comportamiento del cloro es distinto según se utilice como oxidante o como desinfectante. La eficacia del cloro como bactericida aumenta al disminuir el pH, mientras que su eficiencia como oxidante para sustancias tales como Fe⁺², Mn⁺²; aumenta generalmente al aumentar el pH. La estequiometría de las reacciones indica que 1 mg/L de cloro oxida 1,58 mg/L de hierro y 0,78 mg/L de manganeso. La oxidación del hierro y manganeso generalmente se lleva a cabo conjuntamente, excepto en aquellos casos de contenidos altos de Mn sin hierro, para lo cual se hace necesario elevar el pH hasta valores superiores a 10, el pH recomendado de la reacción debe estar entre 6 y 9. Cuando se añade hipoclorito de calcio al agua, se forma el ion hipoclorito el cual al reaccionar con el agua forma el ácido hipocloroso, mediante las siguientes reacciones: [33].



El hipoclorito sódico e hipoclorito cálcico son bases, ambas, que elevarán el pH del agua. La extensión del cambio de pH dependerá de la alcalinidad del agua. El propósito de utilizar

hipoclorito de calcio en el proceso de pre-cloración, es el de oxidar rápidamente el Fe y Mn, disminuyendo el tiempo de contacto y facilitando la remoción de estos en los procesos subsiguientes [33].

El efecto oxidante del cloro aumenta al aumentar el pH, de esta manera sí se aplica a la corriente de agua luego de la etapa de pre-cal, este actuará más como oxidante que como bactericida con lo cual los óxidos de hierro y manganeso se podrán retirar mediante la floculación, la sedimentación y posteriormente la filtración.

4.1.2 Procesos de ablandamiento por zeolita/ intercambio iónico

En este proceso ocurre un intercambio de iones, catiónicos o aniónicos. Este es un proceso útil en la separación, descontaminación y purificación de soluciones que contengan iones tales como el hierro y manganeso. Minerales como la zeolita tienen capacidad de intercambio iónico, esta es una magnitud que da una medida del total de equivalentes de un catión, que es capaz de retener por intercambio iónico, una determinada cantidad de este mineral. Esta capacidad está directamente relacionada con el catión Al presente en la red zeolítica y depende directamente de su composición química. Este proceso puede alcanzar mayores porcentajes de remoción de hierro llegando a tasas de remoción de hasta el 98% y dependiendo de las características del material se puede alcanzar valores de remoción de entre el 18 y 97% de manganeso en aguas subterráneas y superficiales [34].

Para poder implementar las zeolitas se requiere de un tanque donde el agua a purificar tenga la suficiente área de contacto y el tiempo de residencia para que se pueda dar el intercambio iónico, en la planta de El Dorado, el recorrido del agua tiene espacios reducidos, por lo que sí se quiere implementar dichos tanques de intercambio iónico, también se debería desviar el curso del agua lo que significaría una mayor inversión para los conductos y la construcción de los tanques.

4.1.3 Procesos de separación por medios filtrantes

Los medios filtrantes son recursos variados utilizados para diferentes procesos incluida la remoción de hierro y manganeso en las aguas; existen diversos materiales granulares para la filtración, así como diversas configuraciones para la elaboración de los filtros en donde incluso se incluyen materiales adsorbentes, dependiendo de la configuración pueden llegar a porcentajes de remoción de hasta el 99% de hierro y manganeso. Entre los medios más comunes tenemos arenas en combinación con carbón de antracita y carbón activado. Los filtros son dispositivos de tratamiento físico y los mecanismos de eliminación incluyen procesos de atrapamiento físico tales

como la adsorción, asentamiento por gravedad, impactación, tensión, intercepción y floculación. La filtración lenta de arena logra la remoción dentro de los primeros milímetros de profundidad desde la superficie de la arena. Tanto los filtros granulares de lecho profundo como los filtros de pre-revestimiento, hacen uso de un medio de filtrado, y la filtración elimina eficazmente la mayoría esas partículas de metal precipitan que no se sedimentarán. Se puede realizar una filtración mejorada acondicionando el medio filtrante como, por ejemplo, con permanganato para formar una capa de óxido de manganeso en la superficie del medio o usando arena verde la cual es un glucolítico natural capaz de reducir los iones mencionados anteriormente a través de la oxidación y de la filtración [34].

Para implementar esta técnica en el proceso de potabilización, se buscaría un complemento con el cual combinar la antracita que ya se usa en la etapa de filtración, debido a que las características de los medios filtrantes varían de acuerdo a su composición o actuación.

4.1.4 Electrocoagulación

La electrocoagulación (EC) es un método para desestabilizar los contaminantes disueltos o suspendidos presentes en el agua mediante la aplicación de corriente eléctrica en el agua contaminada. El contaminante se elimina del agua debido a la neutralización de su carga eléctrica. Las ventajas del proceso incluyen el no uso de productos químicos, menor producción de lodos y fácil operación. La técnica a menudo se combina con electro flotación las cuales se utilizan ampliamente para la remoción de los metales estudiados. Pudiéndose llegar a porcentajes de remoción de hierro y manganeso de hasta el 98 % en aguas pretratadas o potables [35].

En la técnica de electrocoagulación, se identifica la corriente eléctrica como el insumo destinado a la remoción del hierro y del manganeso, con esto también se identifican como insumos los cátodos y ánodos dispuesto para tal reacción.

4.1.5 Aireación

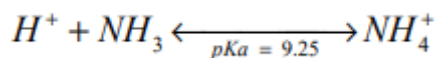
La aireación es el método de introducir oxígeno o aire en los sistemas de tratamiento para la eliminación de metales, este proceso por lo general va acompañado de sistemas de filtración y se recomienda para agua con alta concentración de hierro (mayor de 5 mg/L) con el fin de disminuir los costos en reactivos. El equipo usado en este proceso incluye comúnmente un aireador, un tanque de retención y filtros. El oxígeno de la atmósfera reacciona con las formas solubles de hierro y manganeso del agua cruda para producir óxidos relativamente insolubles de estos

elementos. La velocidad de reacción depende del pH de la solución, siendo más rápida a valores de pH altos. Ya que el manganeso tiene una velocidad de oxidación muy lenta vía el O₂ (ac) esta técnica no es muy efectiva para la remoción de Mn⁺², excepto a valores de pH mayores de 9,5. Para disminuir las concentraciones de manganeso al nivel deseado se requieren frecuentemente un tiempo de reacción y un tratamiento químico adicionales; obteniendo así porcentajes de remoción en aguas subterráneas de hierro y manganeso de hasta un 99%, si se combinan con procesos de filtración [35].

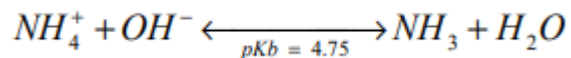
A pesar de contar con una cascada artificial en las primeras etapas del proceso, también se puede complementar con un método de aireación como lo puede ser por burbujeo, en ese caso se identifican como insumos una corriente eléctrica para hacer funcionar el compresor que inyectará el aire y la misma corriente neumática.

4.2 Remoción de amonio

El amonio (NH₄⁺) es un ion cargado positivamente, el cual se forma a partir de la combinación de un átomo de nitrógeno y cuatro átomos de hidrogeno, procede de la disolución en agua del amoniaco (NH₃), siendo una base débil, lo cual reacciona con los protones presentes en el agua, formando iones amonio, siendo un ácido débil. Debido a lo anterior mencionado, si se agrega una base a la solución, esta volverá a reaccionar formando nuevamente amoniaco [36]. Las reacciones pueden representarse de la siguiente manera:



Reacción1.1. *Reacción de disociación del ion amonio en agua*



Reacción1.2. *Reacción de disociación de amoniaco a partir de amonio en agua*

El factor principal que determina si una solución contiene iones amonio o amoniaco, es el pH; es decir que, si el pH es alto, los grupos OH⁻ estarán más presentes en la disolución, predominando el amoniaco. Por el contrario, será predominante el ion amonio, cuando el pH sea bajo, en el cual los grupos H⁺ estarán más presentes en la disolución. Por consiguiente, se puede decir que con un pH del agua (pH =7), el amoniaco se encontrará disociado, presentándose como ion amonio. Cabe

resaltar que la actividad de las dos especies también se ve influenciada por la temperatura y la fuerza iónica que se ejerza en la solución.

Es decir que con un pH inferior a 6 y a temperatura ambiente, la relación de amoniaco será más baja, ya que la mayor cantidad de nitrógeno amoniacal estará presente en forma de amonio. Cuando se cuente con pH mayor a 9, se contará aproximadamente con una proporción del 50% de amoniaco, por consiguiente, cuando el pH sea superior a 11, la solución contará con todos los iones amonio en forma de amoniaco.

Tabla 14

Porcentaje de concentración de ion amonio y amoniaco en función del ph

| Reacción 1.1 - $H^+ + NH_3 \rightarrow NH_4^+$ | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| % NH_3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,06 | 0,56 | 5,32 | 35,97 | 84,89 | 98,25 | 99,82 | 99,98 |
| % NH_4^+ | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,99 | 99,94 | 99,44 | 94,68 | 64,02 | 15,11 | 1,75 | 0,18 | 0,02 |
| Reacción 1.2 - $NH_4^+ + OH^- \rightarrow NH_3 + H_2O$ | | | | | | | | | | | | | |
| pH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| % NH_3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,06 | 0,56 | 5,32 | 35,97 | 84,89 | 98,25 | 99,82 | 99,98 |
| % NH_4^+ | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,99 | 99,94 | 99,44 | 94,68 | 64,02 | 15,11 | 1,75 | 0,18 | 0,02 |

Nota. Porcentaje de concentración de ion amonio y amoniaco en función del pH. Tomado de: Cid Amor, Á. (2014). Estudio de viabilidad de un proceso de eliminación de amonio mediante electrooxidación en la EDAR Valle del Vinalopó (Elda). *Universidad de Alicante*, 75.

El amonio proviene de la descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados o de la fijación biológica, esto se debe a que el ion que contiene puede adherirse a las partículas del suelo cuya carga es negativa, generando que no se incorpore al agua subterránea [37]. Es decir que el amonio puede estar presente en el agua de diferentes formas, dependiendo de las condiciones y fuentes de contaminación a las que este expuesto el efluente, ya sea por descargas de aguas residuales, fertilizantes agrícolas, descomposición de materia orgánica o procesos industriales.

La presencia de amonio en medios acuáticos genera una problemática ya que puede causar una fuerte disminución del oxígeno disuelto en las aguas naturales y toxicidad para los organismos acuáticos, presentándose debido a la eutrofización, lo cual consiste en el crecimiento desmedido de algas en el medio, generando un crecimiento de materia orgánica, y con esto un empeoramiento en la calidad del agua. En cuanto al agua de consumo humano, es importante remover

significativamente la presencia de este compuesto, ya que, a altas concentraciones, es perjudicial para la salud humana, puesto que puede generar daños en los pulmones o en la piel, presentándose como quemaduras de tipo alcalino. Además, si no se controla la presencia o pH de la solución, estará presente en forma de amoníaco, causando problemas en cuanto al sabor u olor del agua.

De igual forma es importante tener presente la importancia de la presencia del ion amonio durante la desinfección, ya que la presencia de amoníaco no deseado combinado con el cloro altera la fuerza de desinfección, disminuyendo. Existen procesos en los cuales se realiza intencionadamente la mezcla de amoníaco y cloro, con el fin de formar monocloraminas, conteniendo un residual más estable y generando que la desinfección pueda lograr mantenerse por más tiempo en el sistema de distribución hasta llegar al grifo, garantizando la reducción de costes de materias primas, puesto que se previene la sobredosificación de cloro o amoníaco.

A partir de los anterior se realizó una revisión documental de sociedades científicas basado en los métodos más eficientes para la remoción de ion amonio presente en el agua, dependiendo de las condiciones que presenta la disolución.

Los métodos de remoción de amonio en agua más utilizados en la industria están basados en tecnologías fisicoquímicas, entre los cuales encontramos arrastre con aire, cloración al break point, precipitación química y electro oxidación. [38].

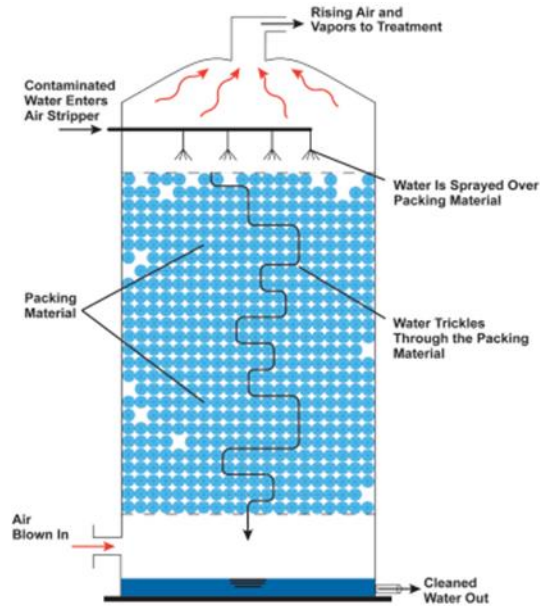
4.2.1 Tecnologías fisicoquímicas

4.2.1.a Arrastre con aire (Air stripping). Es el proceso en el cual se transporta aire a través del agua contaminada (ion amonio + agua), con el fin de remover los compuestos orgánicos volátiles, siendo sustancias químicas que se evaporan con facilidad, ya que, logran cambiar de líquido a gas. Es decir que el aire que circula por medio de la solución ayuda a evaporar estas sustancias más rápido, siendo capturados y tratados en el exterior.

Funciona por medio de un tanque o separador de aireación para forzar el aire a través del agua contaminada y evaporar los compuestos orgánicos volátiles. Las dimensiones y características del equipo dependerán de las cantidades del contaminante y del agua a tratar. Uno de los separadores más comunes para este proceso es el separador de aire de columna empacada [39].

Figura 69

Estructura de un Separador de columna empacada

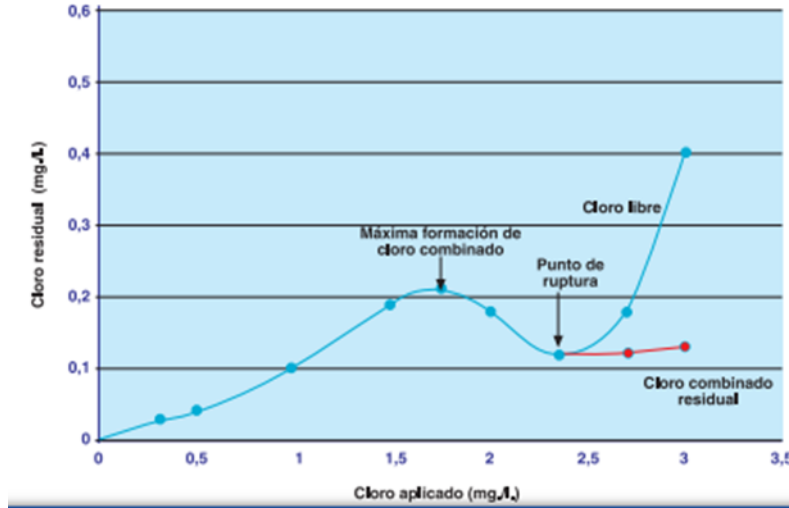


Nota. Estructura de un separador de columna empacada. Tomado de: United States Environmental Protection Agency. (2021). *Community Guide to Air Stripping. 2.*

4.2.1.b Cloración al Break Point. Se efectúa por medio de la adición del cloro al agua en cantidades que permiten oxidar el nitrógeno amoniacal a nitrógeno gaseoso. Siendo el Break Point la dosis mínima de cloro usado para deshacer los compuestos formados por este y la materia orgánica. El agua al reaccionar con el ion amonio presente, forma compuestos denominados cloraminas, siendo estas las involucradas en el poder desinfectante, siendo una ventaja el uso de este método, puesto que las concentraciones de nitrógeno amoniacal pueden reducirse hasta un valor cercano a cero en el efluente [40].

Figura 70

Evolución del cloro residual en la cloración de agua natural



Nota. Evolución del cloro residual en la cloración de agua natural.
Tomado de: Ramírez-Quirós, F. (2005). Tratamiento de Desinfección del Agua Potable. En *Canal Educa*.

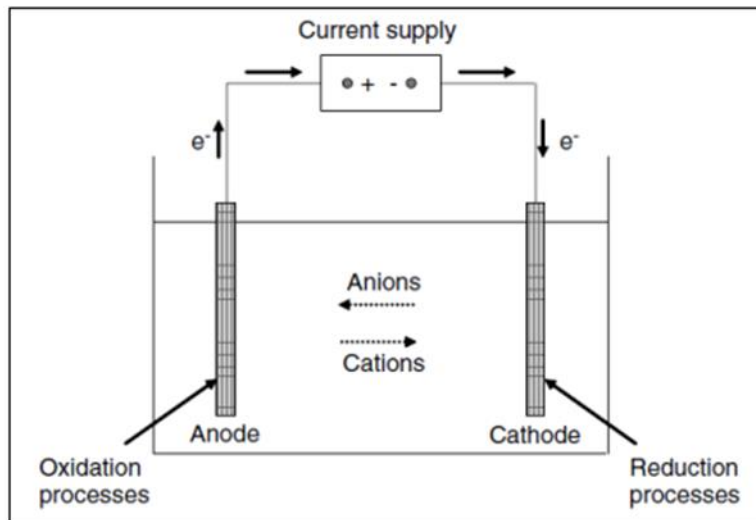
4.2.1.c Electro oxidación. La electrooxidación es una alternativa eficiente para la remoción de N-NH_4 presente en el efluente, se realiza mediante el paso de una corriente eléctrica por el agua quien actúa como electrolito por medio de una ánodo y cátodo, su función principal es transformar el ion amonio en nitrógeno gas [35].

La degradación del amonio ocurre principalmente por el proceso de oxidación indirecta o directa, en donde el contaminante es destruido en la solución debido al papel que realizan los oxidantes fuertes generados por las reacciones electroquímicas [41]. Se tiene en cuenta la variación del tiempo de operación, la densidad de la corriente y los tipos de ánodos y cátodos. Entre las ventajas más relevantes del método, están la facilidad en cuanto a la operación, ya que solo es necesario un reactivo que en este caso es la electricidad, no es necesario obras extras en cuanto a procesos o maquinaria, no hay inversión en la compra de reactivos, lo que conlleva a que no existan subproductos en el proceso; a comparación de los otros métodos en los cuales se deben llevar a cabo procesos externos al principal, en este la actividad es mínima en el tratamiento, es un proceso que se puede automatizar de forma sencilla, con lo cual la necesidad operativa sería mínima. Sin

embargo, el costo de energético es alto por lo cual se debe tener en cuenta como desventaja del método.

Figura 71

Esquema de un proceso de oxidación electroquímica



Nota. Esquema de un proceso de oxidación electroquímica. Tomada de: Anglada, Ángela; Urtiaga, Ane; Ortiz, Inmaculada. “Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: Fundamentals and review of applications”. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 84: 1747 – 1755. 2009

En la siguiente tabla se realiza un resumen de las alternativas para la remoción de amonio, teniendo en cuenta el tratamiento que se lleva a cabo, el coste tanto de la inversión como de la parte operativa. De igual forma se menciona el residuo generado por el método y algunas de las desventajas más relevantes con las que cuenta.

Figura 72*Métodos de remoción de amonio*

| Método | Tratamiento | Coste de la inversión | Eliminación del contaminante | Residuos generados | Coste operativo | Desventajas |
|---------------------------------|--|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|--|
| Arrastre con aire | Adición de reactivos para incrementar el pH | Alto | Completa | Es absorbido por el medio filtrante | Alto | Se deben tener en cuenta el manejo de residuos, el coste energético, se debe tener en cuenta que tipo de absorbente se implementará. |
| Cloración al Break-Point | Adición de cloro | Medio | Parcial | Subproductos de la cloración | Alto | Se deben tener en cuenta la remoción de subproductos. |
| Precipitación química | Adición de reactivos | Medio | Parcial | Sales solubles | Muy alto | Se deben tener en cuenta la remoción de subproductos y es costoso. |
| Electrooxidación | Se hace uso de corriente eléctrica por el afluente | Alto | Completa | Se elimina el nitrógeno gas inocuo | Muy alto | Se debe tener en cuenta que al hacer uso de corriente eléctrica el gasto operacional y energético se incrementará. |

Nota. Métodos de remoción de amonio. Tomada de Works, E. (s. f.). ¿Cómo eliminar amonio del agua potable? <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/como-eliminar-amonio-del-agua-potable>

5. CONCLUSIONES

Se caracterizaron las aguas del embalse La Regadera mediante el análisis fisicoquímico de cada una de las muestras tomadas mediante el sistema Morning Glory entre abril del 2022 y marzo del 2023. Los parámetros que se midieron fueron turbiedad, color aparente, pH, hierro, manganeso y amonio; los cuales presentaron distintos comportamientos a lo largo del periodo ya descrito, donde se evidenciaba en algunos casos la homogenización en las aguas del embalse, y en otros casos se denotaban diferencias entre las aguas obtenidas a distintas profundidades de la represa.

Se realizó un análisis de un factor hidroclimatológico como lo son las lluvias; mediante los datos suministrados por el departamento de hidrología de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá se analizaron los datos de precipitaciones acumuladas por día, con esto se logró determinar las épocas de lluvia y sequía que se presentaban en la zona. Como conclusión del análisis de las precipitaciones como factor se determinó que estas no afectan directamente al embalse, pero estas afectan los afluentes de la represa, ya sea por aumento de caudal de los ríos que desembocan en La Regadera que pueden ocasionar movimientos en las aguas del mismo, como por arrastre de minerales, materia orgánica y fertilizantes al cauce del río los cuales llevan dichas sustancias al contenido del embalse.

Al igual que con el análisis que se realizó para las precipitaciones, se procesaron los datos de dirección y velocidad del viento que se presentan en la zona de La Regadera; estos datos fueron obtenidos por la estación hidrometeorológica situada en la misma represa y fueron brindados por la empresa de Acueducto. Al procesar los datos, se determinó que la velocidad máxima registrada entre abril del 2022 hasta marzo del 2023 fue de 11,3 Km/h, lo que se denomina como viento “flojito” mediante el número de Beaufort, lo cual establece que estos vientos no tienen la capacidad de generar un movimiento en las aguas del embalse para producir una homogeneidad en el recurso hídrico. Mediante los registros de dirección del viento, se obtuvieron 39.927 registros de dirección del viento, de los cuales 31.144 indicaban un viento con dirección al sureste, esto representa el 78% con lo cual se concluye que, al no existir una cantidad considerable de vientos opuestos, no se pueden generar remolinos en el cuerpo de agua que genere el efecto de homogenización al interior del embalse.

Se realizó una revisión bibliográfica sobre remoción de hierro y manganeso con el fin de suministrar información sobre tratamientos alternativos que se puedan emplear en la planta de

potabilización, al recolectar la información se pueden identificar como insumos el Dióxido de cloro, el hipoclorito de sodio, el permanganato de potasio, el uso de zeolitas, implementar un método de aireación y suministrar una corriente eléctrica para lograr la remoción de las especies anteriormente nombradas.

Partiendo de la revisión bibliográfica realizada, se concluye que como consecuencia del efecto nocivo que tiene la presencia de amonio o amoniaco en el agua, es importante el estudio de los diferentes métodos para su eliminación, esto con el fin de contar con una calidad de agua óptima tanto para la salud humana como para la vida útil de las tuberías. Partiendo de los diferentes procesos que se pueden realizar, la electrólisis o electro oxidación es eficaz ya que es capaz de eliminar hasta casi un 100% de los iones amonios presentes en efluente, sin embargo, el gasto energético es considerable, por lo que se busca hacer uso de fuentes renovables de energía con el fin de producir hidrógeno verde, en cuanto al arrastre con aire, se puede decir que es un proceso con menor eficacia y rendimiento, además de ser costoso; la cloración al break point, genera subproductos de las cuales se tendría que considerar un proceso adicional para su remoción; la precipitación química, hace uso de reactivos lo que lleva a mayores costos y subproductos, finalmente como el tratamiento biológico es de igual forma eficaz, removiendo hasta un 90% el nitrógeno amoniacal en aguas potables, siendo una tecnología innovadora en el mercado y económico, sin embargo se debe considerar el proceso natural de las bacterias o microorganismos a usar.

Cada uno de los métodos anteriores se estudiaron con el fin de ser añadidos a los procesos que se realizan en la planta de tratamiento de agua El Dorado, teniendo en cuenta la más eficaz que en este caso es la electrooxidación, se contempla que sean implementados finalizando el proceso de tratamiento, considerando el pH del efluente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]EAAB, “La infraestructura de Acueducto.” [En línea]
<https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/>
- [2]EAAB, “Sistemas de abastecimiento.” [En línea]
<https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/>
- [3]EAAB, “Almacenamiento y embalses.” [En línea]
<https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/almacenamiento-y-embalses/>
- [4]EAAB, “Sistema Sumapaz.” [En línea]
<https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/captacion/sistema-sumapaz/>
- [5] EAAB, “Plantas de tratamiento – El Dorado” [En línea]
<https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemasabastecimiento/plantas-de-tratamiento/>
- [6] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, “Procedimiento Para El Método De Jarras En La Coagulación-Floculación del Agua”, Gestión ambiental, Agua, ICONTEC, Bogotá D.C., 2001. [En línea] https://www.academia.edu/18093528/NORMA_NTC_3903
- [7] Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO C. Sistemas de Potabilización” Vargas Liévano, Armando (Ed.). Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.2010. [En línea]
https://www.catorce6.com/images/legal/Titulo_C_Potabilizacion.pdf
- [8] Bravo, W. A.-R. (2015). Potabilización del agua: Principios de diseño. control de procesos y laboratorio. Colombia: Universidad piloto de Colombia.
- [9] GUALÍ, E. A. (2016). Evaluación De La Calidad Del Agua En La Planta. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

- [10] Plantas de tratamiento. (s. f.). (E.A.A.B.) Recuperado 27 de mayo de 2021 Plantas de tratamiento. (s. f.). (E.A.A.B.) Recuperado 27 de mayo de 2021.
- [11] Ministerio de Medio Ambiente. (2000). Libro blanco del agua en España. España
- [12] Jiménez, B. (2001). La contaminación ambiental en México. México, D.F: LIMUSA, Noriega Editores
- [13] World Health Organization. (s. f.). Directrices sobre la calidad del agua potable. Organización Mundial de la Salud. Recuperado 4 de junio de 2021, de https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/es/
- [14] User, S. (s. f.). Leyes | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado 4 de junio de 2021, de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/leyes>
- [15] NS-013. (2008). Norma técnica de servicio: Monitoreo y clasificación limnológica de reservorios y fuentes superficiales de abastecimiento de agua. Bogotá D.C: E.A.A.B. N. J. Galvis González, “Ensayos de tratabilidad del agua, una herramienta concluyente para el diseño de plantas de potabilización”, Trabajo de investigación, Ciencias Contables Económicas y Administrativas, Universidad de Manizales, Manizales, Colombia, 2014. [En línea]
https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/1751/Ensayos%20de%20tratabilidad%20del%20agua_una%20herramienta%20concluyente%20para%20el%20dise%C3%B1o%20de%20plantas%20de%20potabilizacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [16] Moreno, A. R. (2012). El agua: generalidades, tratamientos y procesos de obtención de agua.
- [17] Cadena T. Luisa M., Cuervo L. Jessica A. (2018) Evaluacion De Una Planta Portatil Potabilizadora De Agua Lluvia En Postobon S.A. Colombia: Fundación Universidad de América.
- [18] Campos, I. (2000). Saneamiento Ambiental. Costa Rica: Cámara Costarricense del Libro Campos.

- [19] Bojacá, Rocío del Pilar. (2005) PSO Determinación De Alcalinidad Por Potenciometria. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- [20] K Howe, J Crittenden, G Tchobanoglous & R Trussell, “*Principios de tratamiento del agua.*” México, D.F.: Cengage Learning, (2017).]
- [21] A García-Vargas, M Reyes-Navarrete, A Alvarado-de la Peña, L González-Valdez, D Magdalena-Antuna, E Vázquez-Alarcón, M Estaban-Méndez, M Quintos-Escalante, A Herrera-Benavides. (2012). CLORUROS TOTALES EN EL AGUA DE ABASTECIMIENTO. México, Durango: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Instituto Politécnico Nacional. <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8825/1/clorurosnov12.pdf>
- [22] E Cabrera Molina, L Hernández Garciadiego, H Gómez Ruíz, M Cañizares Macías. (2003). Determinación de nitratos y nitritos en agua. comparación de costos entre un método de flujo continuo y un método estándar. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Química Analítica. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932003000100014#:~:text=Los%20niveles%20de%20nitratos%20y,los%20niveles%20de%20estos%20aumenten.
- [23] Acqua Tecnología. (no date). SULFATOS. Perú, Lima: Acqua Tecnología Perú, Ingeniería en tratamiento de aguas y procesos. [http://acquatecnologiaperu.com/sulfatos.html#:~:text=Los%20sulfatos%20son%20compuestos%20que,yeso%20principalmente%20y%20suelos%20sulfatados\).](http://acquatecnologiaperu.com/sulfatos.html#:~:text=Los%20sulfatos%20son%20compuestos%20que,yeso%20principalmente%20y%20suelos%20sulfatados).)
- [24] Christian Eduardo Valencia Espinoza. (no date). Química Del Hierro Y Manganeso En El Agua, Métodos De Remoción. Ecuador, Cuenca: Universidad De Cuenca, Facultad De Ingeniería. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/754/1/ti881.pdf>
- [25] Diana Barrera Martínez. (2017). Remoción De Manganeso En La Planta De Tratamiento De Agua Potable De Tocancipá – Cundinamarca. Colombia, Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/744/Barrera%20Martínez%20%20Diana%20Isolina%20-%202017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [26] Gloria Lucia Cárdenas Calvachi, Iván Andrés Sánchez Ortiz. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. Colombia, Pasto: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007#:~:text=El%20amonio%20está%20presente%20en,a%20la%20necesidad%20de%20una
- [27] Fernández-santisteban, M. T. (2017). Determinación de coliformes totales y fecales en aguas de uso tecnológico para las centrifugas.
- [28] McFarland, M.L. and Dozier, M.C. (no date) Problemas del agua potable: El hierro y el manganeso, Texas Water. Available at: <https://texaswater.tamu.edu/resources/factsheets/15451sironandman.pdf> (accessed April 19, 2023).
- [29] Evoqua Water Technologies LLC. “Iron And Manganese Removal With Chlorine Dioxide” (2020). En línea: <https://www.evoqua.com/siteassets/documents/products/disinfection/msfemnap.pdf>
- [30] P. Roccaro, C. Barone, G. Mancini. “Removal of manganese from water supplies intended for human consumption: a case study”, *Desalination*, 210, pp. (205–214), 2007.
- [31] Piaw P., Jatuporn W., Wen-Hsiang C. “Removal of manganese(II) and iron(II) from synthetic groundwater using potassium permanganate”, *Desalination and Water Treatment*, 52, p. 5942–5951, 2014.
- [32] Mohamed Elsheikh, H. Guirguis, A. Fathy. “Removal of iron and manganese from groundwater: a study of using potassium permanganate and sedimentation”, 2018.
- [33] Loaiza D. Alvaro. “Remoción De Hierro Y Manganeso En Aguas Subterranas Mediante Doble Filtracion Con Flujo A Presion. Caso El Hormiguero – Cali”. Colombia: Universidad del Valle 2009.
- [34] Guillen Rivas Johandra Raquel, Jaramillo Cedeño Alex Raziel, Baquerizo Crespo Ricardo José, Córdova Mosquera Rosa Alexandra. “Estudio de los procesos de remoción de hierro y

manganeso en aguas subterráneas: una revisión”. Ecuador: Universidad Técnica de Manabí 2021.

- [35] Cid Amor, Á. (2014). Estudio de viabilidad de un proceso de eliminación de amonio mediante electrooxidación en la EDAR Valle del Vinalopó (Elda). Universidad de Alicante, 75.
- [36] Enfermería, A. De. (2010). Universidad Autónoma de Nuevo León. Cdigital.Dgb.Uanl.Mx, 1-108.
- [37] Ramírez-Quirós, F. (2005). Tratamiento de Desinfección del Agua Potable. En Canal Educa.
- [38] Li, Liang; Liu, Yan. “Ammonia removal in electrochemical oxidation: Mechanism and pseudo-kinetics”. Journal of Hazardous Materials 161: 1010 – 1016. 2009
- [39] Díaz Dorado, M. D. 1985. Instalación sanitaria en edificios (para protección contra incendios). (Buenos Aires: 1985)
- [40] Ramírez-Quirós, F. (2005). Tratamiento de Desinfección del Agua Potable. En Canal Educa.
- [41] United States Environmental Protection Agency. (2021). Community Guide to Air
- [42] DÍAZ DORADO, M. D. 1985. Instalación sanitaria en edificios (para protección contra incendios). (Buenos Aires: 1985)
- [43] Enfermería, A. De. (2010). Universidad Autónoma de Nuevo León. Cdigital.Dgb.Uanl.Mx, 1-108.
- [44] Ramírez-Quirós, F. (2005). Tratamiento de Desinfección del Agua Potable. En Canal Educa.
- [45] Cabeza, A., Urtiaga, A., Rivero, M., & Ortiz, I. (2007). Eliminación de amonio de lixiviados de vertederos por oxidación anódica. 144, 715-719.
- [46] Anglada, Ángela; Urtiaga, Ane; Ortiz, Inmaculada. “Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: Fundamentals and review of applications”. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 84: 1747 – 1755. 2009
- [47] López Cabanes, José María. “Procesos Biológicos Aerobios”. Presentación perteneciente a Máster en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua. Universidad de Alicante. Enero 2014

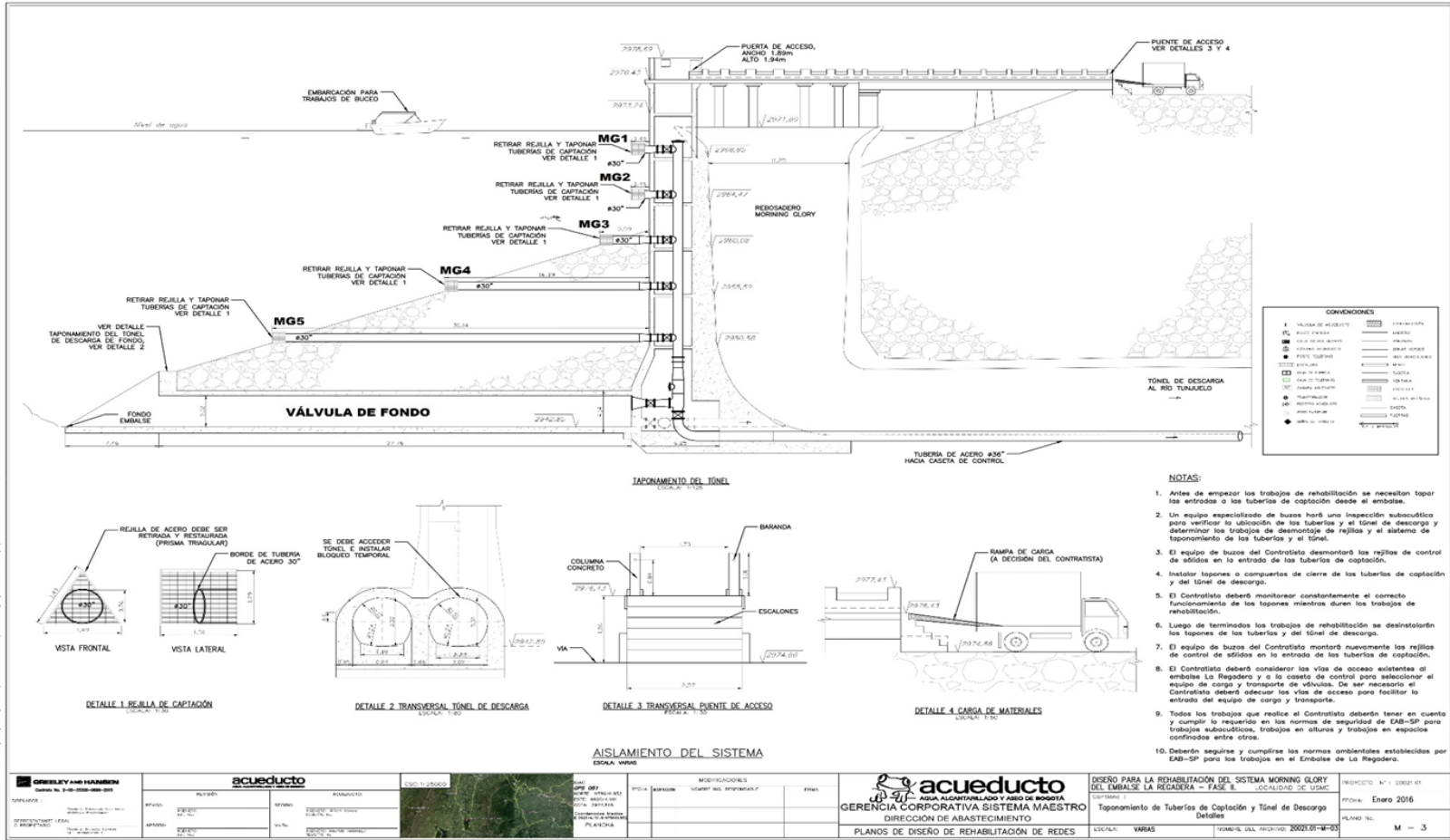
[48] Protección Social, M., & Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, M. (2007). Resolución 2115 de 2007. Diario Oficial No. 46679 de 4 julio de 2007, 1, 23.

[50] Parámetros de calidad de agua potable a la salida de las plantas de tratamiento en la EAAB-ESP, código NS-067. Disponible en: <https://www.acueducto.com.co/webdomino/sistec/consultas.nsf>

[51] Protección Social, M., & Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, M. (2007). Resolución 2115 de 2007. *Diario Oficial No. 46679 de 4 julio de 2007, 1, 23.*

ANEXOS

ANEXO 1



ANEXO 2

RECOMENDACIONES

Las muestras se deben recolectar por una persona profesional con certificación en curso de alturas ya que el acceso al punto en donde se encuentran las diferentes válvulas es de difícil acceso, debe contar con las herramientas y conocimiento para analizar los riesgos y determinar los procedimientos que se llevarán a cabo para un eficiente muestreo. Puesto que el personal que toma las muestras es personal de la PTAP El Dorado y realizar muestreos no es su principal función a pesar de estar capacitados.

De igual forma se recomienda realizar la medición de otros parámetros fisicoquímicos como alcalinidad, óxidos disueltos, sulfatos, nitritos, fosfatos, cloruro, dureza, entre otros con el fin de realizar un análisis más amplio en la caracterización del agua proveniente del embalse La regadera y que se deben tener en cuenta para determinar la calidad del agua para suministro humano.

De igual manera, un análisis microbiológico de las muestras recolectadas, ya que permiten determinar la cantidad de bacterias patógenas, representando un riesgo en la calidad del agua.

Para proponer de una mejor manera las alternativas de tratamiento, se recomienda buscar información en otros idiomas además del inglés y el español, puesto que se encontraron varios artículos en chino mandarín; estas búsquedas junto al conocimiento en diseño de equipos pueden brindar una propuesta mucho más sólida.

Para finalizar, se debe desarrollar un análisis de otros factores que puedan influir en el movimiento del embalse, como el caudal de los afluentes, el movimiento generado por el alivio de la represa mediante el rebose y la válvula de fondo.