

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

"DOSIS ÓPTIMA Y EFICIENCIA DEL COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO UTILIZADO EN EL PROCESO DE FLOCULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EN LA EPS SEDACAJ

Tesis para optar el título profesional de
Ingeniero Ambiental

Autor:

Cesar Antonio Velasquez Cachay

Asesor:

Ing. Dra.Sc.

Irma GERALDA Horna Hernández

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por permitirme llegar a este momento tan importante y especial de mi vida, por haberme dado las fuerzas para terminar este largo y difícil camino.

A mi madre Luzdina, por su amor incondicional, y ser la persona quien me ha acompañado y apoyado durante toda mi vida, gracias por siempre estar ahí, a ti te dedico todo mi esfuerzo y trabajo, sé que sin ti no lo podría hacer.

A mi padre Jaime, mi gran ejemplo, por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos, por enseñarme los valores y principios de una buena persona y que ahora los llevo conmigo.

A mis hermanos, por estar siempre presentes, por ser mi incentivo y motivación para seguir siempre adelante.

Cesar Antonio Velásquez Cachay

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por estar conmigo, cuidarme en todo momento y no dejarme solo, por brindarme la sabiduría y las fuerzas necesarias para tomar decisiones difíciles pero correctas, gracias por ayudarme a ser quien soy.

Agradezco de todo corazón a mis padres y hermanos, quienes han sido la luz que ha marcado mi camino. Con su amor, ejemplo y palabras de aliento he terminado esta etapa de mi formación personal.

También quisiera agradecer de una manera muy especial al Ingeniero Irma Geralda Horna Hernández, asesora de este trabajo, por sus acertadas asesorías, por compartir sus conocimientos y experiencias que fueron guías en el caminar de este proyecto.

Un gran agradecimiento a Ingeniero Marco Narro por su dedicación y tiempo brindados, por su motivación y experiencia, que gracias a ellas he podido terminar satisfactoriamente el estudio.

A todas las personas que de forma directa o indirecta ayudaron a la realización de este trabajo; a la **Empresa Prestadora de Servicios SEDACAJ.S.A** por abrirme sus puertas, a los laboratorios Tecnológico de la división de control de calidad por los equipos y los materiales brindados, sin su ayuda no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
INDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
INDICE DE ECUACIONES	11
RESUMEN	12
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Realidad problemática	13
A. Agua potable.....	18
C. Características fisicoquímicas del agua.....	20
D. TURBIDEZ	20
F. OLOR Y SABOR	23
G. pH	24
H. Tratamientos para la potabilización del agua	25
1.2 Formulación del problema.....	51
1.3 Objetivos.....	51
1.3.1 Objetivo general	51
1.3.2 Objetivo Especifico	52
1.4 Hipótesis	52
1.4.1 Hipótesis General.....	52
1.4.2 Hipótesis específicas.....	52

CAPITULO II. MÉTODO	54
2.1. Tipo de investigación.....	54
2.2. Diseño de investigación	54
2.3. Población	55
2.4. Muestra.....	56
2.6. Materiales, Instrumentos	59
2.7. Procedimiento	61
2.7.1. Preparación de la dosificación de coagulante sulfato de aluminio granulado tipo A.	61
2.7.2. Método de análisis	63
CAPITULO III. RESULTADOS	77
3.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE ENSAYOS DE JARRAS CON DIFERENTES DOSIS DE SULFATO DE ALUMINIO GRANULADO TIPO A.	77
3.1.1. Ensayos en el mes de diciembre.....	77
3.1.2. Ensayos en el mes de enero	79
3.1.3. Ensayos en el mes de febrero	80
3.1.4. Ensayos en el mes de marzo.....	82
3.2. Turbidez inicial y dosis óptimas aplicadas de sulfato de aluminio granulado tipo A.	83
3.2.1. Valores de turbidez inicial en un rango de 0 a 49 UNT.	84
3.2.2. Valores de turbidez inicial en un rango de 50 a 100 UNT.	85
3.2.3. Valores de turbidez inicial en un rango de 101 a 200 UNT.	86

3.2.4. Valores de turbidez inicial en un rango de 201 a 300 UNT.	88
3.2.5. Valores de turbidez inicial en un rango de 301 a 700 UNT.	89
3.3. Relación entre condiciones iniciales, dosis óptimas de sulfato de aluminio granulado tipo A y condiciones finales.	90
3.4. Porcentajes de remoción del parámetro fisicoquímico con sulfato de aluminio granulado tipo A.	92
CAPITULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	97
4.1. Discusión.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXOS	106

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos químicos del Sulfato de Aluminio granulado tipo. Norma Técnica Peruana NTP 311.095-1999.	42
Tabla 2 Número de ensayos realizados durante los meses de estudio.....	75
Tabla 3 Resultados de parámetros fisicoquímicos iniciales del agua cruda en el mes de diciembre.	78
Tabla 4 Resultados de la turbiedad final después del tratamiento con el ensayo de jarras en el mes de diciembre.	79
Tabla 5 Resultados de parámetros fisicoquímicos iniciales del agua cruda en el mes de enero.	80
Tabla 6 Resultados de la turbiedad final después del tratamiento con el ensayo de jarras en el mes de enero.	80
Tabla 7 Resultados de parámetros fisicoquímicos iniciales del agua cruda en el mes de febrero.....	81
Tabla 8 Resultados de la turbiedad final después del tratamiento con el ensayo de jarras en el mes de febrero.	81
Tabla 9 Resultados de parámetros fisicoquímicos iniciales del agua cruda en el mes de marzo.	82

Tabla 10 Resultados de la turbiedad final después del tratamiento con el ensayo de jarras en el mes de marzo.	83
Tabla 11 Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 0 a 49 UNT.	84
Tabla 12 Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 0 a 49 UNT.	84
Tabla 13 Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 50 a 100 UNT.	85
Tabla 14. Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 101 a 200 UNT.	86
Tabla 15 Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 201 a 300 UNT.	88
Tabla 16 Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 301 a 700 UNT.	89
Tabla 17 Condiciones iniciales y finales del parámetro analizado con sus respectivas dosis óptimas.	91
Tabla 18 Remoción de Turbiedad.	93
Tabla 19 Coeficiente de correlación de PEARSON.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la Cuenca Hidrográfica del Rio San Lucas.	19
Figura 2. Potencial zeta contra potencial superficial.	28
Figura 3. Ubicación de la plata de tratamiento Santa Apolonia	46
Figura 4. Planta de tratamiento Santa Apolonia	47
Figura 5. Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica.....	49
Figura 6. Captación en el sector El Ronquillo.....	55
Figura 7. Toma de muestras	57
Figura 8. Ubicación del área de Estudio.....	58
Figura 9. Cámara de reunión	59
Figura 10. Ficha de registro de datos de campo	61
Figura 11. Sulfato de Aluminio granulado TIPO A	62
Figura 12. Equipo de jarras.....	69
Figura 13. Medidor Multiparámetros	71
Figura 14. Preparación del Sulfato de Aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$)	71
Figura 15. Sulfato de Aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$) preparado	72
Figura 16. Ensayo de Jarras para 6 muestras.....	73

Figura 17. Flóculos sedimentados	74
Figura 18. Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 0 a 49 UNT.....	85
Figura19. Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 50 a 100 UNT.....	86
Figura 20. Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 101 a 200 UNT.....	87
Figura 21. Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 201 a 300 UNT.....	89
Figura 22. Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 301 a 700 UNT.....	90
Figura 23. Relación de la dosis óptima de coagulante y la turbiedad inicial	92
Figura 24. Porcentaje de remoción de la turbiedad	94
Figura 25. Curva de regresión ajustada	96

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ecuación de para la formación de hidróxido de aluminio	38
Ecuación 2 Ecuación de la destrucción y precipitación del hidróxido de aluminio	39
Ecuación Ecuaciones 3 de las reacciones del agua con respecto al hidrogeno	39
Ecuación 4 Ecuación de la añadidura de sulfato con respecto al hidróxido de aluminio.....	41
Ecuación 5 Ecuación de la reacción de la cal o soda con el agua	42
Ecuación 6 Ecuación para el volumen de sulfato de aluminio	63
Ecuación 7 Ecuación para la remoción de la turbiedad con sulfato de aluminio granulado TIPO A.....	92

RESUMEN

El presente estudio realizado en la Planta de tratamiento de Agua potable “ SANTA APOLONIA-CAJAMARCA” está orientado a la determinación de la dosis óptima de coagulante Sulfato de Aluminio Tipo A en función del parámetro de turbiedad. Mediante la realización de ensayos de jarras se pudo determinar la dosis óptima para cada turbiedad y elaborar la curva de dosificación de coagulante, obteniendo porcentajes de remoción mayores al 60% y máximos de 99.17% en la mayoría de dosis aplicadas; así mismo se demostró que el sulfato de aluminio granulado tipo A es un coagulante efectivo y adecuado para el tratamiento de aguas destinadas para el consumo humano, cada muestra recogida presenta valores significativos en cuanto a turbiedad con el fin de obtener un rango amplio para analizar y así poder lograr la dosificación óptima de sulfato de aluminio granulado tipo A.

Se determinó que durante los meses de avenidas las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo A, siendo el rango de aplicación en la época de avenidas (diciembre, enero, febrero y marzo), de 50 mg/L a 549 mg/L, al aplicar las dosis en los rangos ya mencionados se puede garantizar que el agua tratada cumpla el LMP de turbiedad (5 NTU), de acuerdo a lo establecido en el Decreto Supremo N° 031 -2010 S.A. (Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano).

Palabras claves: Coagulación, Floculación, Curva de dosificación, Ensayo de jarras, Dosis óptima, coagulante.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Uno de los principales desafíos de la humanidad presentes en el siglo XXI es el de asegurar la suficiente agua y energía para su bienestar, manteniendo conjuntamente la integridad y la capacidad de recuperación de las cuencas hidrográficas. Los problemas de disponibilidad de agua son cada vez mayores, debido al incremento de las demandas y a la escasez de recursos. El gran aumento del consumo de agua que se presenta con tres fines principales: el agropecuario, domésticos e industrial, han creado y siguen creando una muy seria degradación de su calidad debido a los vertidos de residuos contaminantes (hidrocarburos, fertilizantes, metales pesados), muy superior a la tasa de asimilación de los ecosistemas naturales. (FAO, 2014).

Existen tres tipos de extracción de agua en las que se distinguen: las agropecuarias, las domésticas, y las industriales. A nivel global, las proporciones de extracción son alrededor de 70% agropecuario, 11% municipal y 19% industriales. Estas cifras, sin embargo, están influenciadas fuertemente por pocos países que tienen una extracción de agua muy elevada en comparación con otros. Sin embargo, calculando las proporciones de cada país y tomando el promedio de estas globalmente señala que, para un país dado, estas proporciones son de 59%, 23% y 18%

respectivamente. En América del Sur se presenta 74% agrícola, 15% municipal y 11% industrial (FAO, 2014).

Una planta de tratamiento de agua potable, requiere de innovaciones que permitan optimizar la calidad de dicho producto, siendo una de dichas características la turbidez, la misma que contribuye en el cumplimiento con la legislación, que cada día es más exigente y como debe ser, porque ello contribuye con la calidad de vida de la población. (Cogollo,2011).

Para conseguir que esta operación sea llevada a cabo con éxito es necesario el establecimiento de una dosificación de agente coagulante que depende a su vez de la caracterización de las propiedades físicas y químicas del agua y que en conjunto permiten obtener una dosis óptima, es decir la cantidad de coagulante con la cual se conseguirá una mayor reducción de la turbidez, la cual tradicionalmente es calculada empleando dos metodologías: El Ensayo de Jarras y el equipo *Streaming Current Detector* (SCD). Sin embargo, ambos métodos poseen limitaciones al momento de aplicarlos (Campos y Bravo, 2013).

Con la aplicación de una dosis óptima de coagulante se hace posible que la desestabilización de las partículas coloidales y los sólidos suspendidos en el agua que está siendo tratada se produzca de una manera más rápida y al mismo tiempo contribuye con la obtención de un flóculo de mayor tamaño y mayor compactación, lo cual traerá como consecuencia una sedimentación más efectiva en menor tiempo y que además se

retenga menor cantidad de flóculos en los filtros debido a que por su grado de compactación no se rompen al atravesar los lechos filtrantes, generando así una optimización del proceso de Coagulación-Floculación (Heddam et al., 2011).

1.1.1 Antecedentes

1.1.2

Internacionales

(Betancur,2012), en Colombia, estudiaron la calidad del agua cruda del Río Otún que abastece la planta de tratamiento de agua potable de Aguas y Aguas de Pereira pueden presentar fluctuaciones en cortos periodos de tiempo. Por esta razón se requiere un instrumento que permita tomar decisiones rápidas para modificar la dosis de coagulante a utilizar en el tratamiento con base en un criterio cuantificable y preciso como la potencial zeta (ζ). En este estudio se determinó que para un intervalo de ζ desde -2.28 mV a +1.2 mV del agua coagulada se obtiene valores bajos de turbiedad y color del agua sedimentada. Es posible alcanzar un óptimo desempeño del proceso de floculación y sedimentación efectuando mediciones de ζ en el agua coagulada como indicador de desestabilización de las partículas. Z presenta una correlación positiva con la dosis de coagulante aplicada, modificando la dosis de coagulante es posible alcanzar valores de ζ cercanos a cero.

Suárez & Trujillo (2011), en Ecuador; realizan el estudio de diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para la tratabilidad de aguas residuales, concluyendo que para estudios de turbiedad este método es muy adecuado y llegando

a porcentajes de error de 2 %, así como la evaluación adecuada de coagulantes, tanto en concentración como en dosificación; recomendando su uso en estas pruebas.

Lorenzo & Acosta (2006), en Cuba, estudiaron sobre el “estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación y floculación, abordando conceptos generales del tratamiento de aguas por el método químico de coagulación- floculación. Se enumeran y explican las etapas químicas por las que pasan las aguas cuando son tratadas por esta vía. Se mencionan los floculantes más usados y sus características más relevantes. En el proceso influyen una serie de factores químicos e hidráulicos que inciden en la selección del mejor coagulante y su dosis óptima, para lo cual es necesario hacer la “Prueba de Jarras”.

Nacionales

Breña y Rivera (2015) realizaron la investigación titulada Determinación de condiciones de estabilidad de la cancha de relaves de Tamboraque, Cía. Minera Nyrstar-Coricancha; (Perú; 2015), La cancha de relaves de la compañía minera Nyrstar - Coricancha ha sido motivo de preocupación del Estado peruano desde sus inicios. Su desplazamiento hacia abajo, es decir, con relación al río Rímac, ha sido una causa de impactos negativos. De manera adecuada y discreta, la compañía Nyrstar ha estado invirtiendo en investigación geotécnica y ejecución de obras para estabilizar el movimiento reptante de esta cancha de relaves, previniendo un colapso total del material y mitigando un gran impacto negativo sobre el río Rímac, de tal manera que

Los elementos químicos contenidos en el material de esta cancha de relaves no pueden alterar el equilibrio químico de estas aguas para consumo humano, previo proceso de floculación, que son importantes para la capital del Perú. Estos trabajos no solo implican temas de geotecnia (ingenierías geológicas y civiles), sino también la prevención de impactos negativos sobre la zona y todas las áreas que implica la cancha de relaves de Nyrstar-Coricancha, antiguamente llamada Tamboraque, en la trayectoria del río Rímac.

En la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Santa Apolonia en la ciudad de Cajamarca, no se viene manejando una dosis óptima de coagulante en el tratamiento de agua, en ocasiones hace que se utilice más coagulante del necesario provocando una sobredosificación en el agua como también una pérdida económica, pero en otras al dosificar menos de lo necesario no se obtiene una buena operación de coagulación y parámetros físico-químicos como la turbiedad no son removidos adecuadamente, el trabajo consistió en optimizar la dosificación de sulfato de aluminio, con el fin de optimizar el sistema de dosificación del coagulante Sulfato de Aluminio Granulado Tipo A ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$) requerida para el tratamiento del agua de acuerdo a la variación en los parámetros de turbidez y color, y con ésta realizar un tratamiento adecuado para la potabilización del agua en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Santa Apolonia –Cajamarca.

En la investigación es importante resaltar algunas definiciones, las cuales se mencionadas a continuación.

A. Agua potable

Se considera agua potable toda agua natural o de tratamiento que cumpla con todas las normas de calidad establecidas para tal fin, basadas en estudios epidemiológicos, toxicológicos y consideraciones estéticas. El agua potable se produce a partir del tratamiento del agua que proviene de aguas superficiales, subterráneas, atmosféricas, océanos, glaciares, lagunas, mares, entre otros (Castrillón, 2012, p.23).

Los estándares de calidad de agua potable son establecidos por entes reguladores en cada país, los cuales a su vez tienen la obligación de velar por su cumplimiento y garantizar este recurso a cada consumidor (Castrillón, 2012). En el Perú se encuentran regulados por el Ministerio de Salud en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, mediante el Decreto DS N° 031-2010-SA.

Para alcanzar los niveles mínimos de calidad de agua exigidos por las normativas locales y nacionales es necesaria que estas aguas sean sometidas a un conjunto de operaciones unitarias que componen el proceso de potabilización. Generalmente este tratamiento es realizado en Plantas de Tratamiento de Agua Potable.

B. Cuenca del río San Lucas

La Microcuenca del Río San Lucas, abarca una superficie de 7,356.91 has, se localiza en la parte central hacia el oeste de la provincia de Cajamarca, abarcando territorio del distrito del mismo nombre; presenta tres zonas de vida, en altitudes que van desde los 2,660 msnm al sur este, hasta los 3,980 msnm al nor oeste de la Microcuenca, con temperatura promedio entre 8.7 a 13.7°C y una precipitación pluvial promedio entre 711.1 a 1,280.2 mm; su territorio, está dominada por una pendiente empinada el cual cubre una superficie de 2,514.90 has (34.18% del área de la referida Microcuenca); solamente 537.37 has, que equivale al 7.30% del área presenta superficie plana (GORE, 2016-2021).



Figura 1. Ubicación de la Cuenca Hidrográfica del Río San Lucas.

C. Características fisicoquímicas del agua

La presencia de sustancias químicas disueltas e insolubles en el agua que pueden ser de origen natural o antropogénico define su composición física y química. Aunque solamente alrededor del 2% del agua de consumo público se destina a uso de boca, el consumidor es cada vez más exigente en relación al olor y sabor del agua que recibe. Estas dos características, junto con el color y la turbidez (parámetros organolépticos), son los únicos que el consumidor puede apreciar por sí mismo y cualquier cambio que percibe tiende a asociarlo a algún riesgo sanitario. Es por ello que el tema de los gustos y olores en las aguas, sean crudas o tratadas, es un tema de interés creciente para las empresas suministradoras de agua potable y para todas aquellas organizaciones involucradas en el ciclo del agua (Arboleda, 2000, p.33).

D. TURBIDEZ

La turbidez es una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión o interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua; en otras palabras, la turbiedad es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea remitida y no transmitida a través de la suspensión. La turbidez en un agua puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño desde dispersiones coloidales hasta partículas

gruesas, entre otros, arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos, microorganismos, etc.

Actualmente el método más usado para determinar la turbidez es el método nefelométrico en el cual se mide la turbiedad mediante un nefelómetro y se expresan los resultados en unidades de turbidez nefelométrica, UTN. Con este método se compara la intensidad de luz dispersada por la muestra con la intensidad de luz dispersada por una suspensión estándar de referencia bajo las mismas condiciones de medida. Entre mayor sea la intensidad de luz dispersada mayor será la turbiedad. Como suspensión estándar de referencia se usa una suspensión de un polímero de formalina, la cual es fácil de preparar y de mejores características reproducibles que otros materiales anteriormente usados como la arcilla.

La determinación de turbidez es de gran importancia en aguas para consumo humano y en una gran cantidad de industrias procesadoras de alimentos y bebidas.

Los valores de turbidez sirven para determinar el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y, consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración, así como para determinar la potabilidad del agua (Rojas, 2002, p.67).

Las causas más comunes del color del agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, madera, raíces, etc., en diferentes estados de descomposición, y la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales. El color natural en el agua existe principalmente por efecto de partículas coloidales cargadas negativamente; debido a esto, su remoción puede lograrse con ayuda de un coagulante de una sal de ión metálico trivalente como el Al^{+3} o el Fe^{+3} .

Los coloides hidrofóbicos no reaccionan con el agua, pero los hidrofílicos sí; las sustancias que producen el color son hidrofílicas. De importancia en el tratamiento del agua es que los coloides hidrofílicos pueden reaccionar químicamente con el coagulante usado en el proceso de tratamiento de agua, así, los colores hidrofílicos requieren mayor cantidad de coagulante que los hidrofóbicos.

Dos tipos de color se reconocen en el agua: el color verdadero, o sea el color de la muestra una vez que su turbidez ha sido removida, y el color aparente que incluye no solamente el color de las sustancias en solución y coloidales sino también el color debido al material suspendido. El color aparente se determina sobre la muestra original sin filtración o centrifugación previa.

La unidad de color es el color producido por un mg/L de platino, en la forma de ion cloroplatinato, el color es expresado en unidades de la escala Pt-Co.

La remoción del color es una función del tratamiento del agua y se practica para hacer un agua adecuada para usos generales o industriales. La determinación del color es importante para evaluar las características del agua, la fuente del color y la eficiencia del proceso usado para su remoción; cualquier grado de color es objetable por parte del consumidor y su remoción es, por lo tanto, objetivo esencial del tratamiento.

F. OLOR Y SABOR

Los olores y sabores en el agua frecuentemente ocurren juntos y en general son prácticamente indistinguibles. Muchas pueden ser las causas de olores y sabores en el agua; entre las más comunes se encuentran: materia orgánica en solución, sulfuro de hidrogeno, cloruro de sodio, sulfato de sodio y magnesio, hierro y manganeso, fenoles, aceites, productos de cloro, diferentes especies de algas, hongos, etc.

La determinación del olor y el sabor en el agua es útil para evaluar la calidad de la misma y su aceptabilidad por parte del consumidor, para el control de los procesos de una planta y para determinar en muchos casos la fuente de una posible contaminación.

Tanto el olor como el sabor pueden describirse cualitativamente y esto es muy útil especialmente en casos de reclamos por parte del consumidor; en general los olores son más fuertes a altas temperaturas. El ensayo de sabor solo debe hacerse con muestras seguras para consumo humano (Rojas, 2002, p.69).

G. pH

El pH es un indicador de la acidez de una sustancia, siendo ésta una de las propiedades más importantes del agua. El rango varía de 0 a 14, siendo 7 el rango promedio (rango neutral). Un pH menor a 7 indica acidez, mientras que un pH mayor a 7, indica un rango básico. Por definición, el pH es en realidad una medición de la cantidad relativa de iones de hidrógeno e hidróxido en el agua.

Se considera que el pH de las aguas tanto crudas como tratadas debería estar entre 6,5 y 8,5. Por lo general, este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua. El pH tiene una gran influencia en la coagulación. Valores por encima o por debajo del pH óptimo producen malos resultados (Arboleda, 2000, p.10).

H. Tratamientos para la potabilización del agua

Para lograr la potabilización de agua es preciso someter a la misma a varios tratamientos elementales, que comprenden la clarificación, desinfección y acondicionamiento químico y organoléptico. De este modo la clarificación incluye la coagulación – floculación, proceso mediante el cual las partículas presentes en el agua se aglomeran formando pequeñas masas que presentan un peso específico mayor que el del agua, de esta forma las partículas sedimentan y permiten que el agua alcance las características idóneas para el consumo humano (Rodríguez, 2002, p.21).

Coagulación.

Las partículas que forman la turbiedad y el color de las aguas naturales, poseen cargas eléctricas que normalmente son negativas, pero como también existen cargas eléctricas positivas, se puede afirmar que el agua y las soluciones son eléctricamente neutras. Las cargas eléctricas de las partículas generan fuerzas de repulsión entre ellas, por lo cual se mantienen suspendidas y separadas en el agua. Es por esto que dichas partículas no se sedimentan (Rodríguez, 2002, p.115).

Mediante el proceso de coagulación se neutraliza la carga eléctrica del coloide anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas, esta neutralización

suele realizarse aplicando al agua determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes); de forma que los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales dispersas en el agua.

La coagulación y la floculación tienen lugar en sucesivas etapas, de forma que, una vez desestabilizadas las partículas, la colisión entre ellas permita el crecimiento de los microflóculos, apenas visibles a simple vista, hasta formar mayores flóculos. Al observar el agua que rodea a los microflóculos, ésta debería estar clara; si esto no ocurre, lo más probable es que todas las cargas de las partículas no han sido neutralizadas y por tanto la coagulación no se ha completado, en este caso será necesario añadir más coagulante (Acosta, 2006, p.3).

Etapas del proceso de coagulación

Primera Fase: Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la suspensión.

Segunda Fase: Precipitación y formación de componentes químicos que se polimerizan.

Tercera Fase: Adsorción de las cadenas poliméricas en la superficie de los coloides.

Cuarta Fase: Adsorción mutua entre los coloides.

Quinta Fase: Acción de barrido.

Cuando se agrega un coagulante al agua, éste se hidroliza y puede producir la desestabilización de las partículas por simple adsorción específica de los productos de hidrólisis, generalmente con carga positiva, en la doble capa que rodea a los coloides negativamente cargados (compresión de la doble capa o neutralización de las cargas), o por interacción química con los grupos ionizables de su superficie. La teoría química y la de la doble capa son las más aceptadas universalmente y explican la estabilidad de los coloides (Acosta, 2006, p.4).

Potencial Zeta. El conjunto formado por estas partículas constituye un sistema coloidal, formado por una doble capa de iones, el cual es sometido a un potencial en la superficie inferior del doble lecho, denominado potencial Z. Este potencial tiene un valor crítico, por encima del cual los coloides son estables, y por debajo de él, la repulsión en las partículas se reduce a un grado tal que chocando con cierta velocidad pueden unirse y flocular (Rodríguez, 1995, p.115).

El coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución. Este tiene un valor máximo en la superficie y disminuye gradualmente con la distancia, aproximándose a cero fuera de la capa difusa. La caída del potencial y la distancia desde el coloide es un indicador de la fuerza repulsiva entre los

coloides en función de la distancia a las cuales estas fuerzas entran en juego.

Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el potencial zeta, el cual es importante porque puede ser medido de una manera muy simple, mientras que la carga de la superficie y su potencial no pueden medirse. La potencial zeta puede ser una manera efectiva de controlar el comportamiento del coloide puesto que indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides (Restrepo, 2009, p.17).

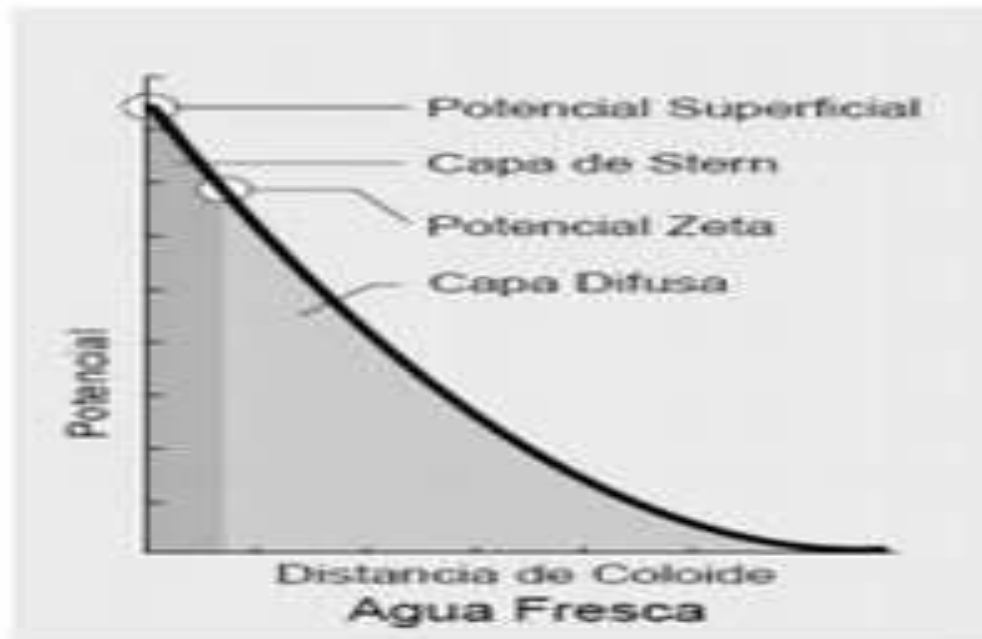


Figura 2. Potencial zeta contra potencial superficial.

Fuente: Elaboración: Tomada de la referencia bibliográfica, RESTREPO OSORNO, Hernán Alonso. Evaluación del Proceso de Coagulación – Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, 2009.

El problema en la coagulación consiste en disminuir el potencial

Z por uno de los siguientes métodos:

- Coagulación por neutralización de la carga: Esta se realiza cuando coloides de diferente signo se mezclan en el agua. Esto es lo que sucede cuando se agrega alumbre o sales de hierro al agua.
- Coagulación por disminución del espesor de la doble capa (distancia d). Al incrementarse la concentración de iones en el agua la “distancia d ” disminuye, hasta hacer el valor del potencial Z inferior al punto crítico.

El fenómeno de la desestabilización se efectúa mediante una serie de reacciones químicas bastante complejas, de las cuales algunas no se han podido entender lo suficiente. Dentro de esas reacciones se encuentran las que se efectúan con las diversas formas de alcalinidad, por lo cual su contenido disminuye. Además, algunas de estas reacciones producen CO_2 , cuyo efecto consiste fundamentalmente en el incremento de la acidez del agua y por consiguiente la disminución del pH.

Factores que influyen en la Coagulación

- Capacidad de cambio: Es una medida de la tendencia a reemplazar cationes de baja valencia por otros de mayor valencia, provocando la desestabilización y aglomeración de partículas en forma muy rápida.
- Tamaño de las partículas: Las partículas deben poseer el diámetro inferior a una micra. Las partículas con diámetro entre una y cinco micras, sirven como núcleos de floc, en cambio de diámetro superior a cinco micras, son demasiado grandes para ser incorporadas en el floc.
- Temperatura: La temperatura cambia el tiempo de formación del floc, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación del floc es mayor.
- Concentración de iones H⁺ o pH: Para cada coagulante hay por lo menos una zona de pH óptima, en la cual una buena floculación ocurre en el tiempo más corto y con la misma dosis de coagulante.
- Relación cantidad-tiempo: La cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación del floc.
- Alcalinidad: La alcalinidad guarda la relación con el pH y por lo tanto el contenido de alcalinidad del agua es uno de los factores por considerar en la coagulación.

pH óptimo de coagulación

El valor del pH es uno de los factores de mayor importancia y efecto sobre el proceso de coagulación, el pH afecta la solubilidad de los precipitados formados por el hierro y el aluminio, así como el tiempo requerido para formación de floc y la carga sobre las partículas coloidales. El pH óptimo para la remoción de coloides negativos varía según la naturaleza del agua, pero usualmente cae entre pH 5,0 a 6,5.

Los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse el hierro o el aluminio y generar problemas al usuario del agua. Cuanto menos sea la dosis de coagulante, tanto mayor será la sensibilidad del flóculo a cambios de pH (Romero, 2002, p.67).

Floculación.

La formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras. Puede ser causada por la colisión entre las partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las superficies sólidas, las fuerzas de Van der Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión, por la reducción de la carga eléctrica que trae como consecuencia la disminución de la repulsión eléctrica.

La floculación puede ser ortocinética, que es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias) y es cuando los contactos son producidos por el movimiento del fluido, o pericinética que es la promovida dentro del líquido por el movimiento que tienen las partículas en él, debido a la agitación y por la gravedad y el peso de las partículas, las que se aglomeran al caer y es cuando el contacto entre las partículas es producido por el movimiento Browniano.

El coagulante aplicado da lugar a la formación del flóculo, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y especialmente su cohesión. Para favorecer el engrosamiento del flóculo será necesaria una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula flóculo (Acosta, 2006, p. 3,4).

Cinética de la Floculación

Tan pronto como se agregan coagulantes a una suspensión coloidal, se inician una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas presentes en la suspensión, las cuales tienen así oportunidad de unirse por sucesivas colisiones hasta formar flóculos que crecen con el tiempo. La rapidez con que esto ocurre depende del tamaño de

partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y de su “grado de desestabilización”, que es el que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia.

Los contactos pueden realizarse por dos modos distintos:

- Floculación Pericinéctica: Contactos por bombardeo de las partículas producidos por el movimiento de las moléculas del líquido (movimiento browniano) que sólo influye en partículas de tamaños menores a un micrón. Sólo actúa al comienzo del proceso, en los primeros 6 a 10 seg. y es independiente del tamaño de la partícula.
- Floculación Ortocinéctica: Contactos por turbulencia del líquido, esta turbulencia causa el movimiento de las partículas a diferentes velocidades y direcciones, lo cual aumenta notablemente la probabilidad de colisión. Efectivo sólo con partículas mayores a un micrón. Actúa durante el resto del proceso, de 20 a 30 min.

Factores que influyen en la Floculación

- **Concentración y naturaleza de las partículas**

La velocidad de formación del floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.

- **Tiempo de detención**

La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación en cámaras. Se puede decir que una eficiencia dada, se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie. Por razones de orden práctico el número de cámaras no puede ser muy grande, estableciéndose un mínimo de tres (3) unidades.

- **Gradiente de velocidad**

Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del floc. El gradiente a través de las cámaras debe ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados (Rodríguez, 1995, p. 115).

Sedimentación.

Se entiende por sedimentación a la remoción, por efecto gravitacional de las partículas en suspensión en un fluido y que tengan peso específico mayor que el fluido. En un determinado intervalo de tiempo no todas las partículas en suspensión sedimentan. Justamente las que

sedimentan en un intervalo de tiempo elegido son llamadas “sólidos sedimentables”.

La sedimentación como tal, es en esencia un fenómeno netamente físico. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada (Pérez, 2006, p.1).

Las partículas en suspensión sedimentan en diferentes formas, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de las partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

- Partículas discretas: son aquellas partículas que no cambian de características, forma, tamaño y densidad durante la caída.
- Partículas floculentas: son aquellas producidas por la aglomeración de las partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas; forma, tamaño y densidad si cambian durante la caída. Este tipo de sedimentación se presenta en la

clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida.

- Partículas por caída libre e interferida: cuando la concentración de partículas es pequeña, cada partícula sedimenta discretamente, como si estuviera sola, no siendo estorbadas por otras partículas. Partiendo del reposo, la velocidad de una partícula bajo la gravedad en un líquido aumentara al ser la densidad de la partícula mayor que la densidad del líquido. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en un lugar individual (Arboleda, 2000, p.35).

Coagulantes

En general, se puede decir que los coagulantes son aquellos compuestos de hierro y aluminio capaces de formar un floc y que pueden efectuar coagulación al ser añadidos al agua. Por otra parte, ayudas de coagulación, en realidad no actúan como tales en la coagulación sino en la floculación generando un floc más pesado.

Los productos químicos que se utilizan normalmente en la coagulación son alúmina (sulfato de aluminio), cloruro férrico, aluminato de sodio, sulfato ferroso y cal. La alúmina es el coagulante de uso más extendido. Entre las ayudas de coagulación se incluye el cloruro de magnesio, el aluminato de sodio, la sílice activa, el almidón y gran número de polielectrólitos de masa molecular alta.

La popularidad de los coagulantes de aluminio y hierro surge no solo de su efectividad como coagulantes, sino también de su disponibilidad y relativo bajo costo. La efectividad de estos coagulantes surge principalmente por su habilidad de formar complejos polinucleares multicargados en solución con mayores características de adsorción.

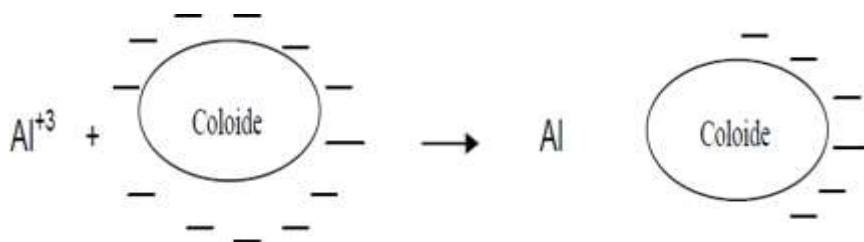
Clases de coagulantes. Los coagulantes se pueden clasificar en dos grupos: los polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los metálicos. Ambos grupos actúan como polímeros a pesar de la carga eléctrica que poseen.

En los primeros, las cadenas poliméricas están ya formadas cuando se los agrega al agua. En los segundos, la polimerización se inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de los cuales viene la etapa de la absorción por los coloides en la fase acuosa.

Es, sin embargo, necesario observar que la velocidad de sedimentación de las partículas no depende en la forma exclusiva de los coagulantes usados sino del peso de las partículas que se trata de sedimentar.

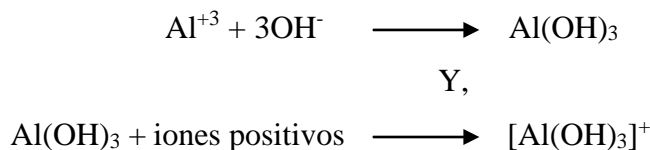
Coagulantes metálicos: Se clasifican en tres tipos: sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios. Las sales de aluminio más conocidas son el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de polialuminio.

Sulfato de Aluminio (alumbre): El sulfato de aluminio es el coagulante estándar usado en tratamientos de aguas. El producto comercial tiene usualmente la fórmula $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$. Se obtiene de la digestión de minerales de bauxita con ácido sulfúrico. El material es empacado en diversas formas: en polvo, molido, en terrones, en granos parecidos al arroz y en forma líquida. El sulfato de aluminio ha estado disponible en todo el mundo con un costo razonable porque ha sido fácil de producir incluso en fábricas muy sencillas. Por esta razón la mayoría de plantas están diseñadas para alum y el personal de las plantas están capacitados para usar el alum. Cuando se añaden soluciones de sulfato de aluminio al agua, las moléculas se disocian en Al^{+++} y SO_4^- . El Al^{+++} puede combinarse con coloides cargados negativamente para neutralizar parte de la carga de la partícula coloidal (Donato, 2006, p.2).

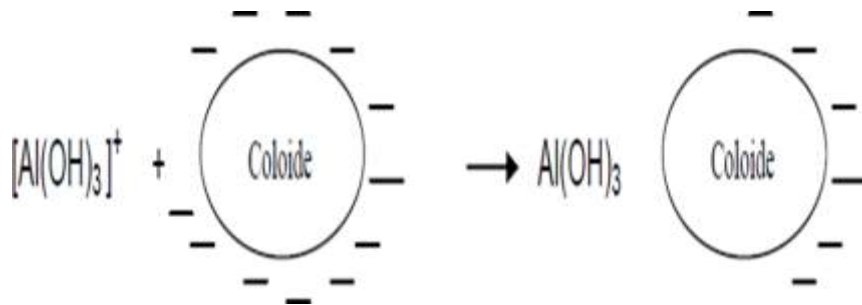


El Al^{+++} puede también combinarse con los OH^- del agua para formar hidróxido de aluminio.

Ecuación 1 Ecuación de para la formación de hidróxido de aluminio

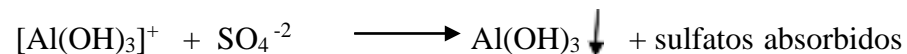


Este hidróxido de aluminio es de carácter coloidal, ya que absorbe iones positivos en solución para formar un sol cargado positivamente. Dicho sol neutraliza la carga de los coloides negativos y ayuda a completar la aglomeración (Loayza,2009, p.3).



Casi siempre se forma un exceso de solución de hidróxido de aluminio y su destrucción y precipitación se logra mediante los iones sulfato y otros iones negativos presentes en el agua.

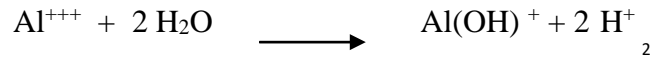
Ecuación 2 Ecuación de la destrucción y precipitación del hidróxido de aluminio



Con respecto a los coagulantes de hierro y a los de aluminio se puede afirmar que los cationes metálicos reaccionan inmediatamente con el agua para formar iones acuimetalicos e hidrógeno; los aniones permanecen libres o combinados con otros cationes. Con alumbre ocurren las siguientes reacciones:

Ecuación Ecuaciones 3 de las reacciones del agua con respecto al hidrogeno





Los iones acuimetálicos son adsorbidos por el coloide negativo y neutralizan su carga superficial permitiendo la coagulación. La coagulación por adsorción y neutralización de la carga es posiblemente el fenómeno predominante en soluciones de alta concentración de coloides.

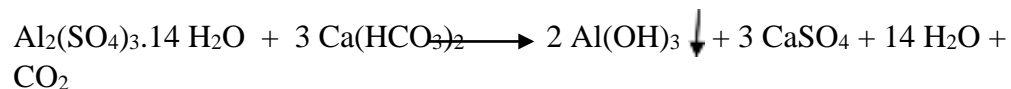
Los coloides pueden ser barridos por los flocs formados, al ser atrapados dentro de ellos durante la floculación y sedimentación; en otras palabras, los precipitados de $\text{Al}(\text{OH})_3$ atrapan los coloides efectuando una coagulación de barrido, la cual predomina en algunas soluciones de concentración coloidal baja. Debe tenerse en cuenta sin embargo, que si se sobre dosifica el coagulante, el fenómeno puede revertirse y resurgir el coloide negativo causando nuevamente el problema de turbiedad y color.

El sulfato de aluminio debe distribuirse a través de toda la masa de agua rápidamente, con el fin de que se logre el contacto con todas las partículas coloidales antes de que se presente la formación de las especies menos deseables.

Esto se logra mediante una mezcla instantánea que provea una buena distribución del coagulante en el menor tiempo posible.

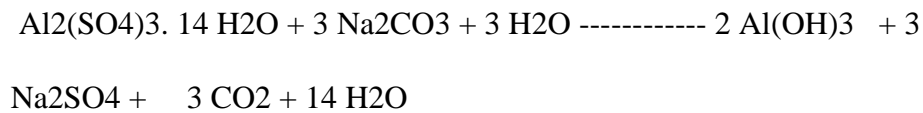
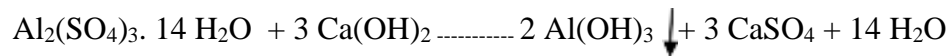
Durante la floculación se completa la aglomeración de las partículas y crecen los flocs hasta una condición adecuada para su sedimentación. Durante la sedimentación el floc se asienta para dejar un líquido clarificado. Cuando se añade sulfato de aluminio al agua este reacciona con la alcalinidad natural del agua para formar floc de hidróxido de aluminio:

Ecuación 4 Ecuación de la adición de sulfato con respecto al hidróxido de aluminio



La producción de CO₂ es indeseable puesto que incrementa la corrosividad del agua; además, la ecuación muestra también como se presenta una conversión de bicarbonato de calcio en sulfato de calcio, o sea una reducción de la dureza carbonacea y un aumento de la no carbonacea, lo cual es también desventajoso desde el punto de vista de remoción de dureza. Si el agua no contiene alcalinidad natural suficiente para reaccionar con el alumbre, es necesario añadir la alcalinidad necesaria. Esto se hace normalmente con cal o soda:

Ecuación 5 Ecuación de la reacción de la cal o soda con el agua



La dosis de alumbre varía normalmente entre 5 a 50 mg/L para aguas naturales. Comúnmente el pH efectivo para coagulación con alumbre es de 5,5 a 8,0 y se prefiere para tratar aguas superficiales de buena calidad por ser el único químico necesario para la coagulación (Romero, 1996, p. 56).

Sulfato de aluminio granulado tipo A

Según la Norma Técnica Peruana NTP 311.095-1999 el sulfato de aluminio granulado tipo A es el que cumple las siguientes especificaciones:

Tabla 1. Requisitos químicos del Sulfato de Aluminio granulado tipo.

Norma Técnica Peruana NTP 311.095-1999.

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Aluminio, Al ₂ O ₃	%	17.00% min.
Basicidad, Al ₂ O ₃	%	0.60% máx.
Hierro, Fe ₂ O ₃	%	0.05% máx.
Insolubles	%	0.20% máx.
Granulometría:		
Malla 6, pasante	%	100.00% min.
Malla 10, pasante	%	60.00% min.

Fuente: Elaboración: Norma Técnica Peruana NTP 311.095-1999.

Planta de tratamiento de Santa Apolonia

La "Empresa Prestadora de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de Cajamarca" (EPS SEDACAJ S.A.) se inicia mediante Ley N.º 501 con razón social SENAPA (Servicio Nacional de Agua Potable y Alcantarillado) y las Unidades Operativas de Celendín, Contumazá, San Miguel, Cutervo, Chota, Bambamarca, Jaén; para luego mediante Decreto Supremo N.º 011 ser creada la filial de SENAPA. Con D.S. N.º 016-PCM-90 se transfiere el patrimonio de los servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario a las Municipalidades Provinciales de Cajamarca, Celendín, Contumazá, Chota, Bambamarca, Jaén, San Miguel con la denominación de EPS SEMDACAJ S.A. Mediante la readecuación de los estatutos sociales en concordancia a la Ley N.º 26338 y su reglamento se forma la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento de Cajamarca EPS SEDACAJ S.A., cuyo objetivo es el desarrollo, control, operación y mantenimiento de los servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario en las localidades de Cajamarca, San Miguel y Contumazá con funciones específicas para este fin, en los aspectos de planeamiento, programación, financiamiento, preparación de proyectos, ejecución de obras, asesoría y asistencia técnica, supervisión de funcionamiento y evaluación de resultados.

La planta de tratamiento es tipo hidráulico convencional con filtración lenta, ubicada en la cota promedio 2793 msnm, esta instalación se alimenta de la captación del río San Lucas. Consta de dos módulos (unidades de floculación, decantación y filtración) similares, paralelos, los cuales no se encuentran interconectados construidos en el año 1941 y 1945 respectivamente, estos módulos se encuentran en cotas diferentes debido a las dificultades constructivas derivadas de una topografía accidentada. La capacidad máxima de tratamiento es de 100 lps. Cuenta con los siguientes componentes:

Cámara de Mezcla Rápida

Compuesta por dos cámaras unidas por un canal y medidor de control Parshall, en esta cámara se aplica sulfato de aluminio para promover la coagulación, el equipo mecánico instalado se encuentra inoperativo.

Tanques de Floculación:

Conformada por dos floculadores paralelos, hidráulicos de flujo horizontal con 44 pantallas verticales cada una. El área promedio de cada floculador es de 120 m², con un volumen de 79 m³ y un tiempo de retención de 27 minutos, para una velocidad horizontal de 0,16 m/s para cada unidad. Ambos floculadores están conectados hidráulicamente a los sedimentadores.

Tanques de sedimentación:

Compuesta por 4 unidades de sedimentación de flujo horizontal, ubicándose 2 unidades en cada módulo de la siguiente forma: sedimentadores 1A y 2 A, en la terraza superior, sedimentadores 1B y 2B, en la terraza inferior de la planta, las unidades de cada módulo trabajan en forma paralela.

Cada tanque presenta un área de 190 m^2 , con una tasa hidráulica de $11,3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ para un caudal de 25 lps. y un tiempo de retención de 300 minutos, presenta una carga hidráulica sobre el vertedero de $13 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hora}$.
Filtros lentos
Compuesto por cuatro unidades de filtración lenta (dos por módulo) con fondo fijo y lecho filtrante de grava y arena. Cada unidad con un área de 299 m^2 (largo 26m., ancho 11.5 m.), la tasa de filtración es de:

1 filtro $14,45 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ (50 L/s en un solo filtro)

2 filtro $7,22 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ (25 L/s en cada filtro). (SEDACAJ, 2010).

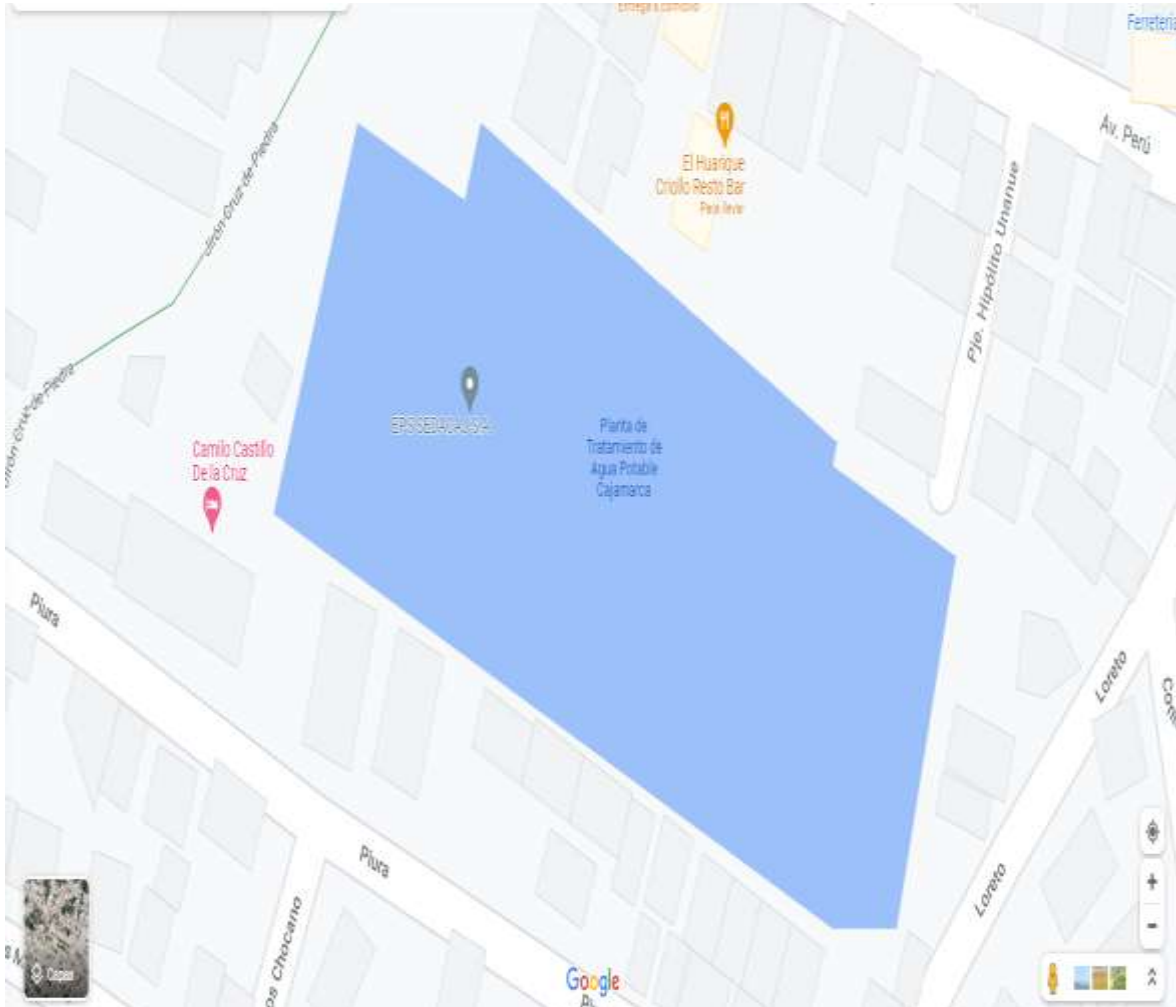


Figura 3. Ubicación de la planta de tratamiento Santa Apolonia

Nota: Imagen tomada de Google maps



Figura 4. Planta de tratamiento Santa Apolonia

Nota: Imagen tomada de Google Earth

La presente investigación está respaldada con la siguiente normativa:

Normatividad peruana

La buena calidad del agua de consumo humano asegura al consumidor su protección contra la presencia de agentes patógenos y compuestos físicos y químicos perjudiciales a su salud. La información que proveen los programas de vigilancia y control del agua para consumo humano, aparte del beneficio relacionado con la disminución de enfermedades

transmitidas por vía hídrica, es un medio que permite el mejoramiento de la calidad del servicio de abastecimiento de agua.

En el Perú la norma que regula los parámetros de calidad de agua para consumo humano se rige bajo las condiciones establecidas por el Ministerio de Salud en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, mediante el Decreto DS N° 031-2010-SA.

Aplica a todas las personas prestadoras que suministren o distribuyan agua para consumo humano, ya sea cruda o tratada, en todo el territorio nacional, independientemente del uso que de ella se haga para otras actividades económicas, a las direcciones territoriales de salud, autoridades ambientales y sanitarias y a los usuarios.

Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA /Ministerio de Salud. Dirección General de Salud Ambiental – Lima: Ministerio de Salud; 2011.

Según este decreto, establece las disposiciones generales con relación a la gestión de la calidad del agua para consumo humano, con la finalidad de garantizar su inocuidad, prevenir los factores de riesgos sanitarios, así como proteger y promover la salud y bienestar de la población.

En el título IX del Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA /Ministerio de Salud. Dirección General de Salud Ambiental – Lima:

Ministerio de Salud; 2011. se establece que el agua apta para el consumo humano es toda agua inocua para la salud que cumple los requisitos de calidad establecidos en el presente Reglamento. En la siguiente tabla se encuentran especificados los límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica:

ANEXO II
LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS DE CALIDAD ORGANOLÉPTICA

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Olor	---	Aceptable
2. Sabor	---	Aceptable
3. Color	UCV escala Pt/Co	15
4. Turbiedad	UNT	5
5. pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6. Conductividad (25°C)	µmho/cm	1 500
7. Sólidos totales disueltos	mgL ⁻¹	1 000
8. Cloruros	mg Cl ⁻ L ⁻¹	250
9. Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ L ⁻¹	250
10. Dureza total	mg CaCO ₃ L ⁻¹	500
11. Amoníaco	mg N L ⁻¹	1,5
12. Hierro	mg Fe L ⁻¹	0,3
13. Manganeseo	mg Mn L ⁻¹	0,4
14. Aluminio	mg Al L ⁻¹	0,2
15. Cobre	mg Cu L ⁻¹	2,0
16. Zinc	mg Zn L ⁻¹	3,0
17. Sodio	mg Na L ⁻¹	200

UCV = Unidad de color verdadero
UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

Figura 5. Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica

Nota: Imagen tomada del Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA /Ministerio de Salud. Dirección General de Salud Ambiental – Lima: Ministerio de Salud; 2011 (RCACH. (2011).)

La presente investigación se justifica

Justificación teórica

Por medio de este trabajo se busca conceptualizar y brindar información como

guía de la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$) para el tratamiento de Agua Potable en la planta de SANTA APOLONIA, de manera que se cumpla el estándar de Turbiedad según lo establecido en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano a través de a prueba de jarras siendo esta la técnica más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros para la potabilización del agua. En ella se tratan de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio.

Justificación Práctica

Por medio de la presente investigación se busca proporcionar nuevas posibilidades de la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$) para el tratamiento de Agua Potable de manera que se cumpla los estándares de Turbiedad y Color según lo establecido en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano.

Justificación Metodológica

La metodología se centró en la evaluación de los parámetros del agua cruda (cámara de reunión de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Santa Apolonia), mediante un monitoreo continuo, para una vez obtener los datos del mencionado monitoreo sea posible la determinación de la dosis optima de sulfato de aluminio granulado tipo A ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$) y la dosificación de esta y así lograr cumplir con los parámetros establecidos en el D.S. N° 031 2010 SA (Reglamento de Calidad de Agua

para Consumo Humano).

Justificación Ambiental

La dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$) para el tratamiento de agua potable en La Planta de Tratamiento de Agua Potable de Santa Apolonia, permitió que el agua sea tratada cumpliendo la normativa ambiental y ante ello que el usuario se encuentre satisfecho con el servicio brindado.

1.2 Formulación del problema

- ¿Cuál debe ser la dosis óptima de sulfato de aluminio a utilizar en el tratamiento de agua potable en la planta Santa Apolonia-Cajamarca, de manera que el parámetro de turbiedad a la salida de la Planta de Tratamiento Santa Apolonia esté dentro de lo establecido en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano (D.S. N° 031-2010-S.A. DIGESA)?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar la dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio en el tratamiento de agua potable en la planta de Santa Apolonia-Cajamarca de manera que se cumpla con el estándar de Turbiedad según lo establecido en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano D.S. N° 031-2010-S.A. DIGESA.

1.3.2 **Objetivo Especifico**

Obtener diferentes dosis de coagulante sulfato de aluminio tipo A ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$) de acuerdo a el parámetro de turbidez del agua cruda mediante la realización de ensayos utilizando la prueba de jarras.

Establecer la dosificación de coagulante y relacionarlo con el parámetro analizado mediante la construcción de sus respectivas tablas y gráficas.

Mantener el agua dentro de los parámetros establecidos en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano (D.S. N° 031-2010-S.A. DIGESA).

1.4 **Hipótesis**

1.4.1 **Hipótesis General**

La dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio utilizado en el tratamiento de aguas de origen superficial, con valores iniciales de turbidez menores a 700 UNT; alcanza una efectividad mayor al 95% en la remoción de turbiedad.

1.4.2 **Hipótesis específicas**

La dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio utilizado en el tratamiento de agua potable se encuentra en el rango de 50-600 mg/L, dependiendo de la turbiedad inicial.

Al aplicar las dosis optimas establecidas según el parámetro de turbiedad presente en el agua cruda, se obtendrá una eficiencia de remoción, con valores mayores del 50% y cercanos al 100%, mejorando la calidad de servicio de la planta de tratamiento.

CAPITULO II.

MÉTODO

2.1. Tipo de investigación

En el presente trabajo se aplicó una investigación correlacional con experimento puro aplicado, cuyo requisito es la manipulación intencional de una o más variables independientes; en el que se mide la correlación entre la variable concentración de floculante y la turbidez.

La variable independiente es la que se considera como supuesta causa en una relación entre variables, es la condición antecedente; y al efecto provocado por dicha causa se le denomina variable dependiente (consecuente), solo midiendo la variable turbidez y manipulando la concentración de floculante como variable independiente (Sampieri,2014, p.130).

2.2. Diseño de investigación

Según las características del estudio se trata de un diseño experimental verdadero reuniendo los dos requisitos para lograr el control y la validez interna, la manipulación de la variable independiente y equivalencia de los grupos, la concentración de floculante puede ser manipulada para determinar la dosis óptima de floculante luego del tratamiento aplicado en las instalaciones de la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento de Cajamarca EPS SEDACAJ S.A.

2.3. Población

El área de influencia del estudio comprende 1 cámara de reunión de la cual se tomaron muestras provenientes de la captación en el sector de Ronquillo, con coordenadas UTM (WGS 84) Este: 772056.29, Norte: 9208089.73 y Altitud: 2817.69, respectivamente. Teniendo una gran relevancia siendo una de las fuentes de agua con una producción promedio de 80l/s, lo que representaría aproximadamente un 30% de abastecimiento para la población de la ciudad de Cajamarca. Las muestras fueron tomadas en un periodo de 4 meses, en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua potable Santa Apolonia.



Figura 6. Captación en el sector El Ronquillo

2.4. Muestra

Se utilizaron 27 muestras de agua cruda de origen superficial del Río San Lucas, ubicado en el sector de Ronquillo, localizado en la cota 2830 msnm de la ciudad de Cajamarca, obtenida desde la planta de tratamiento de Santa Apolonia. El tipo de muestra analizada fue una muestra simple que se tomó en la cámara de reunión de la planta de tratamiento, dependiendo de la variación en las propiedades físicas del agua.

Las muestras fueron recogidas por el personal de turno de la planta de tratamiento de agua potable Santa Apolonia especialmente en días lluviosos ya que en estos días es donde se presentan mayores variaciones de turbidez y estas se almacenaron en baldes plásticos de un volumen aproximado de 20 L. Por medio de llamadas telefónicas y mensajes de texto el personal informaba de la obtención de las muestras de agua cruda recogidas para proceder a asistir a la planta de tratamiento de Santa Apolonia en el menor tiempo posible para realizar los posteriores análisis.

Para la toma de muestras se utilizó el **Protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales-DIGESA**, el monitoreo de la calidad sanitaria de los Recursos Hídricos se ejecuta a través de la Red de Vigilancia conformada por la DIGESA y las Direcciones Ejecutivas de Salud Ambiental (DESA's) del país quienes se encargan de la parte operativa llevando a cabo el cumplimiento del “Protocolo de Monitoreo de la Calidad Sanitaria de Recursos Hídricos Superficiales”, priorizando el uso del recurso a monitorear (fuente de abastecimiento de población; preservación de recurso hídrico de

impactos potenciales; la actividad industrial y/o antropogénica), la misma que deberá ser detallada en forma concreta y sustentada. (DIGESA,2007).



Figura 7. Toma de muestras

2.5 Ubicación del área de Estudio

El área de estudio está situada dentro de las instalaciones de la planta de tratamiento de agua potable Santa Apolonia, La planta de tratamiento es tipo hidráulico convencional con filtración lenta, ubicada en la cota promedio 2793 msnm, esta instalación se alimenta de la captación del río San Lucas. Consta de dos módulos (unidades de floculación, decantación y filtración) similares, paralelos, los cuales no se encuentran interconectados construidos en el año 1941 y 1945 respectivamente, estos módulos se encuentran en cotas diferentes debido

a las dificultades constructivas derivadas de una topografía accidentada. La capacidad máxima de tratamiento es de 100 lps.

La investigación comprende 1 cámara de reunión con coordenadas UTM (WGS 84) Este: 773789.20, Norte: 9207612.67 y Altitud: 2794 msnm.

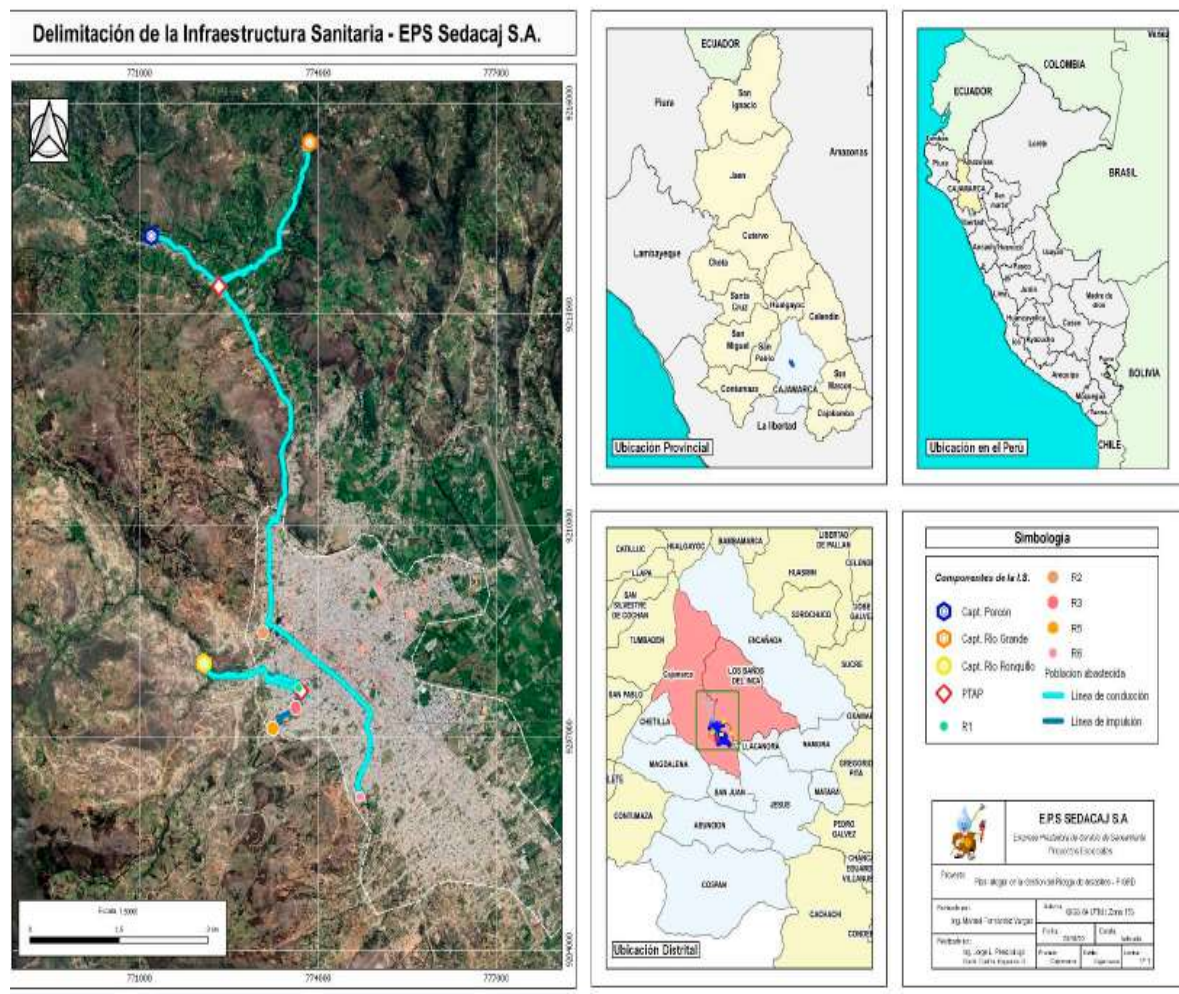


Figura 8. Ubicación del área de Estudio

Fuente: E.P.S SEDACAJ S.A.



Figura 9. Cámara de reunión

2.6. Materiales, Instrumentos

Materiales:

- ✓ Ficha de registro de datos de campo
- ✓ Baldes plásticos de un volumen aproximado de 20 L.
- ✓ Cámara fotográfica.
- ✓ Libreta de apuntes.

- ✓ Lapicero.
- ✓ Celular Android.

Instrumentos:

- ✓ Impresora.
- ✓ Computadora.
- ✓ GPS.
- ✓ Turbidímetro Nefelométrico Hach 2100 – Q.
- ✓ pHmetro.
- ✓ Equipo de prueba de jarras.

ANEXO N° 1

MINISTERIO DE SALUD
Dirección General de Salud Ambiental
DIGESA*

FICHA DE REGISTRO DE DATOS DE CAMPO
PROGRAMA DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HIDRICOS

Río

DESA :

N° Estación	Origen de la Fuente	Descripción del Punto de Muestreo	Localidad	Distrito	Provincia	Departamento	Fecha y Hora de Muestreo	T °C	pH	STD mg/L	OD mg/L	Conductividad umhos/cm	Coordenadas UTM		Observaciones	
													Este	Norte		

..... de del 2007

(Nombre y Apellidos)
Responsable de la Vigilancia de la Calidad de los Recursos Hídricos

Figura 10. Ficha de registro de datos de campo
Fuente: Protocolo de Monitoreo de la Calidad Sanitaria de Recursos Hídricos Superficiales -Digesa

- 2.7. Procedimiento**
- 2.7.1. Preparación de la dosificación de coagulante sulfato de aluminio granulado tipo A.
- Para el tratamiento de agua cruda en la planta Santa Apolonia se utiliza como coagulante sulfato de aluminio granulado TIPO A, cuyo proveedor los 4 meses de análisis: diciembre, enero, febrero y marzo, fue la empresa ARIS. S.A.

- La solución de sulfato de aluminio granulado tipo A se prepara en un tanque que tiene un volumen de $13,5 \text{ m}^3$ donde se adicionan 11 bultos del coagulante y cada bulto tiene una cantidad de 50 kg para un total de Sulfato de aluminio agregado de 550 kg. Se realiza una agitación constante para una mayor homogenización, obteniéndose una solución final con una concentración de 50000 mg/L (5%).



Figura 11. Sulfato de Aluminio granulado TIPO A

Para la realización de los análisis se procedía a tomar en un beaker con un volumen de 100 mL de la solución del coagulante que se encontraba preparado en el tanque de Sulfatos. Dicha solución era tomada para cada día de análisis.

- La dosificación de sulfato de aluminio granulado tipo (A) a utilizar en cada prueba se preparaba utilizando la siguiente relación:

$$V_i C_i = V_f C_f \dots\dots\dots (6)$$

Ecuación 6 Ecuación para el volumen de sulfato de aluminio

V_i = Volumen de sulfato de aluminio a dosificar

C_i = Concentración de la solución de sulfato de aluminio inicial

V_f = Volumen del agua cruda a analizar

C_f = Concentración deseada de sulfato de aluminio

2.7.2. Método de análisis

Los ensayos realizados se hicieron por duplicado, primero eligiendo rangos más amplios en la dosificación de coagulante sulfato de aluminio granulado TIPO A y de acuerdo a los resultados obtenidos, se emplearon rangos más pequeños para determinar la dosis óptima de coagulante.

Prueba de jarras

La prueba de jarras es la técnica más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros para la potabilización del agua. En ella se tratan de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio.

Existe en el mercado una gran variedad de equipos para pruebas de jarras, pero en toda su versatilidad debe radicar en utilizar una serie de jarras al mismo tiempo y la

posibilidad de variación de la velocidad de agitación (rpm) En este proceso influyen factores químicos e hidráulicos. Entre éstos tenemos:

1. pH
2. Temperatura
3. Concentración de coagulante
4. Secuencia de aplicación de las sustancias químicas
5. Grado de agitación
6. Tiempo de sedimentación

El pH desempeña un papel muy importante en el estudio de los fenómenos de coagulación- floculación, es así como una parte de la carga de las partículas coloidales que han absorbido iones OH^- , queda destruida por un aumento de la concentración de iones H_3O^+ que ocasiona una disminución de la estabilidad de la suspensión coloidal.

Preferiblemente el pH debe quedar dentro de la zona correspondiente al mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante usado.

Para sales de hierro la zona de pH es mucho más amplia, alcanzándose el mínimo de solubilidad a $\text{pH} > 5$ (Water, 1983).

La temperatura del agua también influye grandemente en la efectividad de la coagulación y en la velocidad de formación del flóculo. Según disminuye la temperatura

del agua debe aumentarse la dosis de productos químicos usados para coagular, con el objetivo de lograr o asegurar la formación de flóculos adecuados.

El tiempo de mezclado del coagulante en el agua a tratar será el necesario para que el producto utilizado se difunda con la mayor rapidez posible. El tiempo de coagulación es extraordinariamente breve, menos de un segundo y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar (PRMCAH, 1992, p.6).

El ensayo de jarras ha sido ampliamente usado; sus resultados tienen gran aplicabilidad en el diseño y la operación real de las unidades de tratamiento, así como en la optimización de plantas existentes. El procedimiento requiere como datos previos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda.

La unidad de mezcla típica consiste en una serie de agitadores de paletas acoplados mecánicamente para operar a la misma velocidad, generalmente entre 10 a 300 RPM. Como jarras de coagulación se recomienda, jarras rectangulares de 1 a 2 litros en acrílico transparente (SENA, 1999).

Condiciones de la prueba de jarras

Debido a que la prueba de jarras es sólo una simulación del proceso, es necesario mantener las condiciones operacionales que existen en el proceso industrial como son:

gradiente hidráulico y tiempo en la mezcla lenta y rápida, punto de aplicación de los reactivos, el orden y el tiempo de dosificación de los mismos.

- **Mezcla rápida**

El objetivo de la mezcla rápida es crear la turbulencia o movimiento necesario en el líquido contenido en la jarra para poner en contacto los reactivos químicos con las partículas coloidales del agua, modo de neutralizar sus cargas, desestabilizarlas y hacer que se aglomeren en un corto período de tiempo. El tiempo de aplicación de la mezcla rápida depende de la clase del coagulante.

Por ejemplo, los polímeros se distribuyen más lentamente que los iones metálicos debido a su mayor molécula, por lo tanto, requerirán mayor tiempo o mayor gradiente de velocidad que los coagulantes metálicos hidrolizantes.

- **Mezcla lenta**

Generalmente, el tiempo de mezcla no excede de 15 min. Un tiempo excesivo puede crear calentamiento de la muestra originando una floculación más eficiente, pero a su vez una pobre sedimentación, ya que ocurre la liberación de los gases disueltos en el agua, formando burbujas que se adhieren a los flóculos y los hacen flotar (PRMCAH, 1992, p.8).

- **Reposo (Sedimentación).**

Durante este tiempo los coloides sedimentan por gravedad y se obtiene el agua clarificada.

Procedimientos para llevar una prueba de jarras.

- Las soluciones químicas deben ser recién preparadas. Mientras algunas soluciones químicas se benefician con el tiempo, la mayoría se deterioran. Los resultados obtenidos con muestras añejas no son representativos.
- Las muestras para las pruebas deben ser lo más representativa del sistema y en cantidad suficiente para una serie de pruebas completas. En las muestras viejas la turbidez del agua usualmente coagula más fácilmente que en las muestras frescas, debido a la inestabilidad de la suspensión coloidal; por lo que no se recomienda correr pruebas de jarras con más de dos horas de captadas.
- La adición de químicos debe realizarse en el mismo orden en que son añadidos en planta o en el caso de la clarificación a nivel domiciliario. A las jarras se añaden normalmente coagulantes, floculantes y/o ajustadores de pH. Algunas

plantas usan el cloro para la desinfección, oxidando la materia orgánica y eliminando parte del color.

- Se debe tener cuidado de no demorar la adición de los químicos si se necesita una adición simultánea de los mismos, ya que se estarían alternando las condiciones de la prueba.

Criterios para la evaluación

Para evaluar los resultados de una prueba de jarras no se siguen criterios convencionales o patrones universales y casi se trata de un criterio particular del analista, fabricante del equipo, operario de la planta de acuerdo a su larga experiencia, pero bajo la convicción que le da la certeza de trabajar en las mismas condiciones experimentales y bajo los mismos criterios analíticos (PRMCAH, 1992).

No obstante, en la práctica se observan ciertos lineamientos a seguir para evaluar una prueba de jarra, como son:

- Características de los flóculos: Tamaño, uniformidad, velocidad de aparición, voluminosos, de poco peso, si son densos, livianos y difusos, apenas puntos o microflóculos.

- Calidad del sobrenadante: La claridad o transparencia, es el criterio más importante en la evaluación de una prueba de jarras, ya que es lo que se persigue en la clarificación del agua. Para ello se mide la turbiedad final del agua.
- Se debe observar si el sobrenadante es totalmente transparente, semiturbio, turbio, con apreciable cantidad de material suspendido (TSS), decantado, semidecantado, entre otros (Fontanills, 1998).



Figura 12. Equipo de jarras

2.7.3. Preparación de muestras.

El procedimiento consistió en tomar una muestra aproximadamente de un volumen de 20 L de agua de cámara de reunión y determinar inicialmente los parámetros como turbidez y pH a una muestra de agua homogenizada.

Los respectivos análisis físicos – químicos se los realizó en el laboratorio de control de calidad, de acuerdo al cronograma asignado por el Ing. Alfredo Chávez Álvarez, responsable del laboratorio, en base a la disponibilidad del mismo; los días lunes, miércoles y viernes, en horario de 8h00 a 16h00.

Medición inicial de los parámetros influyentes para la Coagulación y Floculación

Al tener preparadas las muestras recolectadas con el nivel de turbidez diferente, se procedió a registrar de manera inicial el comportamiento de cada uno de los parámetros que son influyentes en el proceso de la Coagulación y Floculación. La turbidez, color y Ph y fueron monitoreadas con un Medidor Multiparámetros HI 9829 marca HANNA.



Figura 13. Medidor Multiparámetros



Figura 14. Preparación del Sulfato de Aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$)



Figura 15. Sulfato de Aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$) preparado

Se colocaban porciones de dos litros de muestra en cada uno de los vasos de precipitados del equipo de jarras y posteriormente se encendía las lámparas.

El equipo se programaba para su funcionamiento de la siguiente manera, se mantenía la agitación de las aspas a 300 rpm durante un minuto, (mezcla rápida o coagulación), luego se disminuía la velocidad de agitación a 45 rpm y se mantenía durante 5 min, después se bajaba a 35 rpm durante 5 min, después a 25 rpm durante 5 min y para finalizar a 15 rpm por 5 min.

Para la dosificación del agua con el coagulante (sulfato de aluminio granulado TIPO A) se procedía a tomar los volúmenes ya establecidos anteriormente utilizando pipetas de acuerdo a estos volúmenes y se hacía en proporción creciente simultáneamente a todos los

vasos. Por ejemplo 10 mg/L, 20 mg/L, 30 mg/L, etc. Inmediatamente después de dosificar el agua se le daba inicio al equipo.



Figura 16. Ensayo de Jarras para 4 muestras

Transcurridos los minutos de agitación en el equipo, se procedía a dejar sedimentar las partículas floculadas durante un tiempo de 10 min, en los cuales se podía observar la apariencia y consistencia del flóculo y su velocidad de decantación.

Pasados los 10 min de sedimentación, se tomaban muestras de 100 mL aproximadamente de cada vaso y después se hacían las mediciones correspondientes para cada parámetro evaluado (turbiedad).



Figura 17. Flóculos sedimentados

Finalmente, se determinaba la dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio TIPO A seleccionando aquella dosis en donde los valores de color y la turbidez fueran más bajos y se encontraran dentro del rango permisible según el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, mediante el Decreto DS N° 031-2010-SA.

Tabla 2

Número de ensayos realizados durante los meses de estudio.

Mes	Número de ensayos realizados
Diciembre	4
Enero	5
Febrero	2
Marzo	16

2.7.4. Paquete y análisis estadístico

- En la investigación se utilizó paquete estadístico Excel, con los resultados experimentales obtenidos se procedió a construir tablas que relacionan los parámetros de turbidez y las dosis de coagulante aplicadas, ordenadas por los meses en que se realizaron los ensayos.
- Posteriormente se construyeron las tablas y gráficas respectivas donde se relacionan las dosis óptimas de coagulante y la turbiedad del agua cruda.
- Se hallaron los porcentajes de remoción de turbiedad después del tratamiento con Sulfato de Aluminio tipo A.

- Se tabularon los resultados obtenidos de una forma que se relacionaran las condiciones iniciales y finales del agua (turbiedad) con las dosis óptimas de coagulante encontradas.
- Este paquete estadístico, nos permite confeccionar tablas cruzadas de variables de una matriz de datos, resumiendo la información de una o más variables de una investigación. Permittiéndonos conocer la correlación entre las variables que son objeto de este estudio.
- Por último, se aplicó **coeficiente de correlación de Pearson en Excel**, logrando demostrar la relación entre las dos variables, midiendo el nivel de dependencia de una variable respecto de otra variable independiente. teniendo carácter de medida lineal entre ambas variables aleatorias cuantitativas.

CAPITULO III.

RESULTADOS

3.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE ENSAYOS DE JARRAS CON DIFERENTES DOSIS DE SULFATO DE ALUMINIO GRANULADO TIPO A.

A continuación, se encuentran los datos experimentales de los parámetros fisicoquímicos del agua cruda evaluados y sus respectivos resultados después del tratamiento con sulfato de aluminio mediante el ensayo de jarras, organizados por meses en los que se realizaron los ensayos.

3.1.1. Ensayos en el mes de diciembre

Según el SENAMHI, Cajamarca posee un clima templado, el cual es lluvioso en verano (de noviembre a abril) y seco en invierno (de mayo a septiembre). Entre ambas estaciones hay lluvias esporádicas e irregulares. En la ciudad de Cajamarca, ubicada en esta zona climática, las temperaturas varían entre una media de 13°C en invierno y 14,5°C en verano. Las precipitaciones anuales promedian los 700 mm. Los pobladores denominan chirapa a este paradójico fenómeno de llovizna ligera; en días soleados, al noreste predomina una región de selva tropical, en la cual hay fuertes precipitaciones durante todo el año, con un promedio anual superior a los 750 mm. Las temperaturas oscilan entre los 20°C y 23°C en San Ignacio y entre los 24° y 26°C en Jaén. En el departamento se presenta ocasionalmente el fenómeno de las heladas, producidas por los cielos despejados, que cubren los campos de

escarcha y queman los cultivos. Las heladas se concentran en los meses de junio (del 24 al 29), agosto (del 10 al 20), octubre-noviembre (helada de Todos los Santos) y diciembre (helada del fenómeno de El Niño: del 20 al 25).

Con la presencia del fenómeno del niño a lo largo de las costas peruanas, es un fenómeno recurrente tiene una duración de varios meses. Ahora sabemos que este calentamiento marino-costero se acentúa cada cierto número de años, siendo una manifestación de los cambios que ocurren en las capas superficiales y subsuperficiales del océano. Esto está vinculado a interacciones complejas con la atmósfera que se producen en el Océano Pacífico ecuatorial, a miles de kilómetros de la costa peruana en el Océano Pacífico (SENAMHI, 2018).

En el mes de diciembre se analizaron cuatro muestras que fueron recogidas por el personal de la planta en los días en que se presentaron variaciones representativas de los parámetros estudiados debido a las precipitaciones.

Tabla 1

Resultados de parámetros fisicoquímicos iniciales del agua cruda en el mes de diciembre.

N° DEL DEL ENSAYO	FECHA	TURBIEDAD (UNT)	COLOR (UPC)	pH	—
1	12/12/2020	24,5	234	8,78	
2	13/12/2020	5,52	68	7,88	
3	19/12/2020	272	1545	7,9	
4	19/12/2020	686	4475	8,14	

Tabla 2

Resultados de la turbiedad final después del tratamiento con el ensayo de jarras en el mes de diciembre.

N° DEL ENSAYO	TURBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIFICACIÓN $Al_2(SO_4)_3$ mg/L				TURBIEDAD FINAL (UNT)				DOSIS ÓPTIMA $Al_2(SO_4)_3$ mg/L
		1	2	3	4	1	2	3	4	
1	24,5	40	44	47	50	16,4	5,35	1,47	1,77	50
2	5,52	20	23	26	29	5,31	1,84	0,9	0,72	23
3	272	49	51	53	57	5,09	6,84	8,81	13,1	49
4	686	65	69	73	77	3,35	3,22	2,5	2,7	65

3.1.2. Ensayos en el mes de enero

En el mes de enero se analizaron cinco muestras que fueron recogidas por el personal de la planta en los días en que se presentaron variaciones representativas de los parámetros estudiados.

Tabla 3

Resultados de parámetros fisicoquímicos iniciales del agua cruda en el mes de enero.

N° DEL ENSAYO	FECHA	TURBIEDAD (UNT)	COLOR (UPC)	pH
5	23/01/2021	6,3	77	8,7
6	23/01/2021	18,9	204	7,68
7	24/01/2021	121	892	9,01
8	24/01/2021	8,69	78	9,22
9	24/01/2021	288	2060	9,37

Tabla 4

Resultados de la turbiedad final después del tratamiento con el ensayo de jarras en el mes de enero.

N° DEL ENSAYO	TURBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIFICACIÓN Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L				TURBIEDAD FINAL (UNT)				DOSIS ÓPTIMA Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L
		1	2	3	4	1	2	3	4	
5	6,3	22	26	30	34	9,06	8,69	1,6	1,03	30
6	18,9	45	46	47	48	1,72	5,88	3,62	2,96	47
7	121	48	56	60	64	2,12	7,1	12	16,2	48
8	8,69	24	28	32	36	9,68	7,98	2,10	1,22	32
9	288	56	60	64	68	2,09	2,42	2,67	2,75	68

3.1.3. Ensayos en el mes de febrero

En el mes de febrero se analizaron dos muestras que fueron recogidas por el personal de la planta en los días en que se presentaron variaciones representativas de los parámetros

estudiados debido a la emergencia sanitaria, gran número de personal de planta se contagió de SARS-CoV-2.

Tabla 5

Resultados de parámetros fisicoquímicos iniciales del agua cruda en el mes de febrero.

N° DEL ENSAYO	FECHA	TURBIEDAD (UNT)	COLOR (UPC)	pH
10	13/02/2021	10,8	114	9,51
11	13/02/2021	13,7	143	9,0

Tabla 6

Resultados de la turbiedad final después del tratamiento con el ensayo de jarras en el mes de febrero.

N° DEL ENSAYO	TURBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIFICACIÓN Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L				TURBIEDAD FINAL (UNT)				DOSIS ÓPTIMA Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L
		1	2	3	4	1	2	3	4	
10	10,8	20	26	32	34	9,28	7,32	3,12	2,17	32
11	13,7	30	34	36	37	12,09	8,74	6,95	1,07	37

3.1.4. Ensayos en el mes de marzo

En el mes de marzo se analizaron diecisiete muestras que fueron recogidas por el personal de la planta en los días en que se presentaron variaciones representativas de los parámetros estudiados los días que se presentaron precipitaciones, las cuales fueron abundantes en este mes.

Tabla 7

Resultados de parámetros fisicoquímicos iniciales del agua cruda en el mes de marzo.

N° DEL ENSAYO	FECHA	TURBIEDAD (UNT)	COLOR (UPC)	pH
12	3/03/2021	16,1	134	8,42
13	3/03/2021	24,2	157	8,33
14	5/03/2021	91,5	1052	7,66
15	5/03/2021	95,2	794	8,51
16	7/03/2021	132	1098	8,51
17	7/03/2021	199	1300	7,66
18	17/03/2021	30	259	7,58
19	20/03/2021	401	3320	7,39
20	20/03/2021	173	1000	8,23
21	22/03/2021	183	1760	8,9
22	22/03/2021	57,3	483	8,68
23	22/03/2021	249	1930	8,41
24	27/03/2021	50,7	367	8,57
25	27/03/2021	77,8	514	8,54
26	29/03/2021	158	1920	8,57
27	29/03/2021	303	2440	8,32

Tabla 8

Resultados de la turbiedad final después del tratamiento con el ensayo de jarras en el mes de marzo.

N° DEL ENSAYO	TURBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIFICACIÓN Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L				TURBIEDAD FINAL (UNT)				DOSIS ÓPTIMA Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L
		1	2	3	4	1	2	3	4	
12	16,1	20	28	36	44	12,9	12,6	10,9	1,39	44
13	24,2	45	48	51	54	2,29	1,46	1,51	1,2	45
14	91,5	38	40	42	44	2,82	1,89	1,93	1,13	38
15	95,2	40	42	44	46	4,22	3,01	2,72	1,97	40
16	132	42	44	46	48	2,96	2,18	1,39	0,97	42
17	199	64	66	67	69	1,65	2,46	2,72	5,22	67
18	30	20	28	36	44	9,72	11,6	2,17	1,66	36
19	401	47	49	53	56	2,63	4,70	4,67	5,07	49
20	173	39	41	43	45	3,07	2,25	2,2	1,97	39
21	183	60	63	66	69	20,1	16,0	19,3	17,0	63
22	57,3	30	38	46	54	27,8	2,17	1,1	1,24	38
23	249	43	47	50	53	4,34	2,08	2,58	2,68	43
24	50,7	31	33	35	37	16,8	1,8	3,72	1,74	35
25	77,8	37	39	41	43	24,4	1,96	3,41	2,73	41
26	158	43	45	47	49	6,92	6,58	3,22	1,72	47
27	303	43	45	47	549	1,9	1,33	0,79	2,51	549

3.2. Turbidez inicial y dosis óptimas aplicadas de sulfato de aluminio granulado tipo A.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos de las turbiedades iniciales del agua cruda organizadas por rangos y las dosis óptimas halladas después del tratamiento con el ensayo de jarras, además de sus respectivas graficas turbiedad Vs dosis

óptimas de sulfato de aluminio. Con el fin de analizar los datos obtenidos de una manera más clara.

3.2.1. Valores de turbidez inicial en un rango de 0 a 49 UNT.

A continuación, se muestra la tabla y la gráfica correspondiente a los ensayos comprendidos en un rango de turbiedad que va de 0 a 49 UNT, dentro del cual se encuentran 10 ensayos.

Tabla 9

Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 0 a 49 UNT.

N° DEL ENSAYO	TURBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIS OPTIMA $Al_2(SO_4)_3$ mg/L
2	5,52	23
5	6,3	30
8	8,69	32
10	10,8	32
11	13,7	37
12	16,1	44

Tabla 10

Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 0 a 49 UNT.

N° DEL ENSAYO	TURBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIS ÓPTIMA $Al_2(SO_4)_3$ mg/L
6	18,9	47
13	24,2	45
1	24,5	50
18	30	36

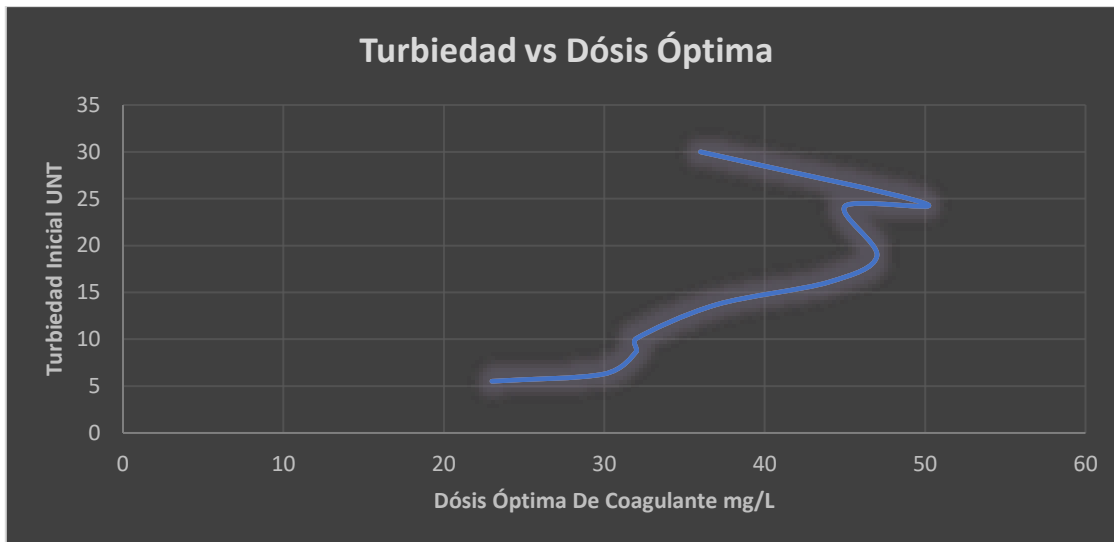


Figura 18. Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 0 a 49 UNT.

3.2.2. Valores de turbidez inicial en un rango de 50 a 100 UNT.

A continuación, se muestra la tabla y la gráfica correspondiente a los ensayos comprendidos en un rango de turbiedad que va de 50 a 100 UNT, dentro del cual se encuentran 5 ensayos.

Tabla 11

Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 50 a 100 UNT.

Nº DEL ENSAYO	TURBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIS ÓPTIMA $Al_2(SO_4)_3$ mg/L
24	50,7	35
22	57,3	38
25	77,8	41
14	91,5	38
15	95,2	40

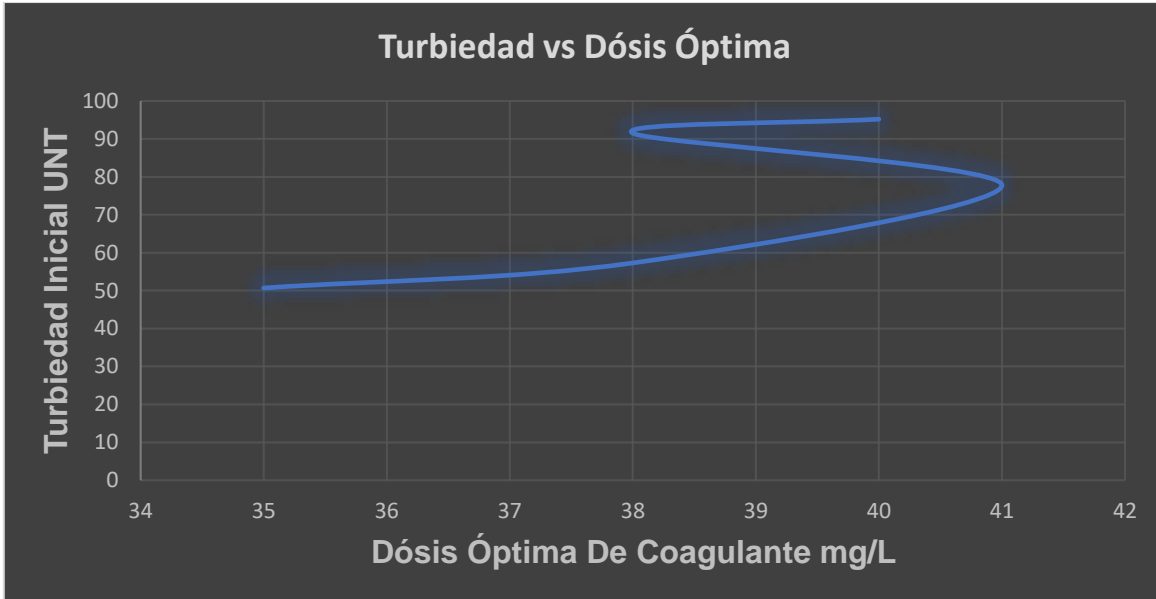


Figura19. Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 50 a 100 UNT.

3.2.3. Valores de turbidez inicial en un rango de 101 a 200 UNT.

A continuación, se muestra la tabla y la gráfica correspondiente a los ensayos comprendidos en un rango de turbiedad que va de 101 a 200 UNT, dentro del cual se encuentran 6 ensayos.

Tabla 12. Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 101 a 200 UNT.

N° DEL ENSAYO	TUBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIS ÓPTIMA Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L
7	121	48
16	132	42
26	158	47
20	173	39
21	183	63
17	199	67

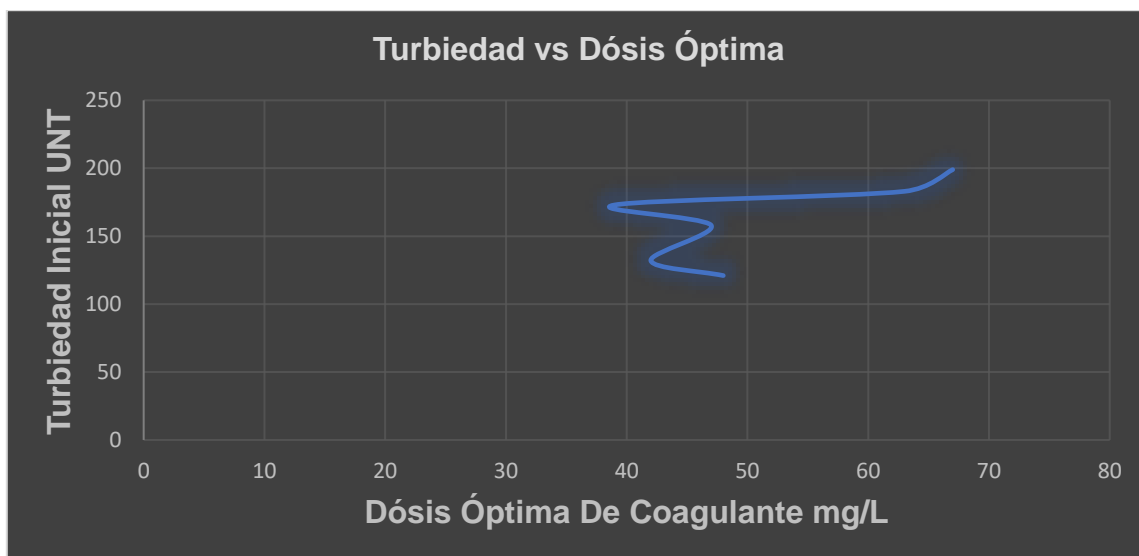


Figura 20. Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 101 a 200 UNT.

3.2.4. Valores de turbidez inicial en un rango de 201 a 300 UNT.

A continuación, se muestra la tabla y la gráfica correspondiente a los ensayos comprendidos en un rango de turbiedad que va de 201 a 300 UNT, dentro del cual se encuentran 3 ensayos.

Tabla 13

Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 201 a 300 UNT.

N° DEL ENSAYO	TUBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIS ÓPTIMA Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L
23	249	43
3	272	49
9	288	68

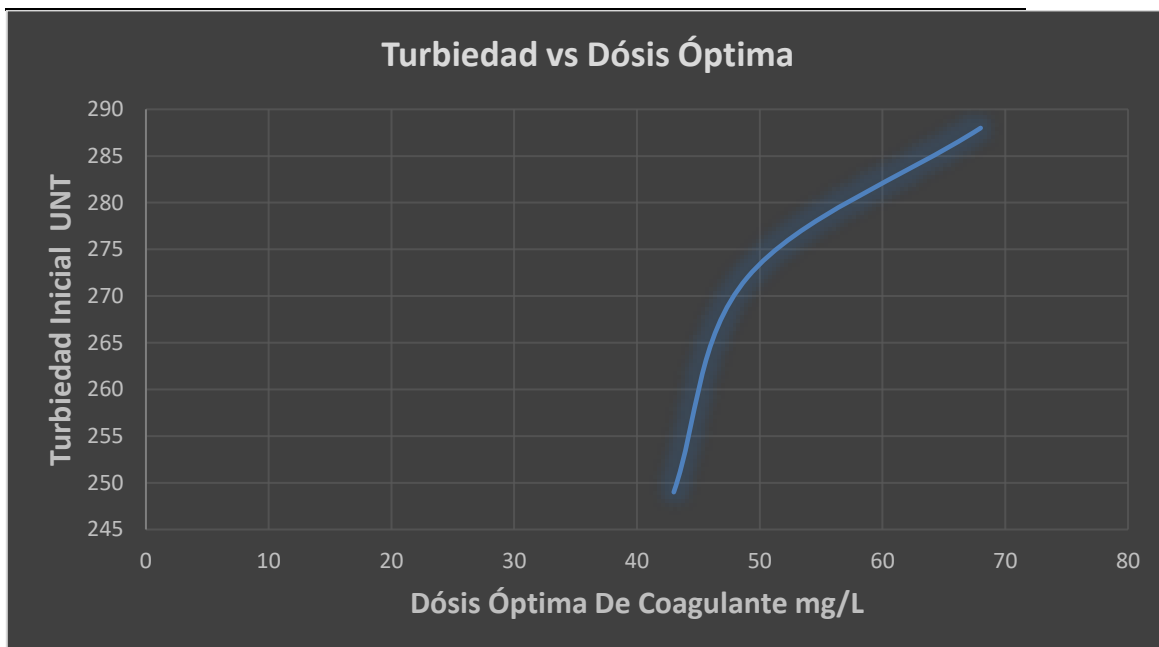


Figura 10 Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 201 a 300 UNT.

3.2.5. Valores de turbidez inicial en un rango de 301 a 700 UNT.

A continuación, se muestra la tabla y la gráfica correspondiente a los ensayos comprendidos en un rango de turbiedad que va de 301 a 700 UNT, dentro del cual se encuentran 3 ensayos.

Tabla 14

Resultados de la turbiedad inicial y sus dosis óptimas en un rango de 301 a 700 UNT.

N° DEL ENSAYO	TUBIEDAD INICIAL (UNT)	DOSIS ÓPTIMA $Al_2(SO_4)_3$ mg/L
27	303	549
19	401	49
4	686	65

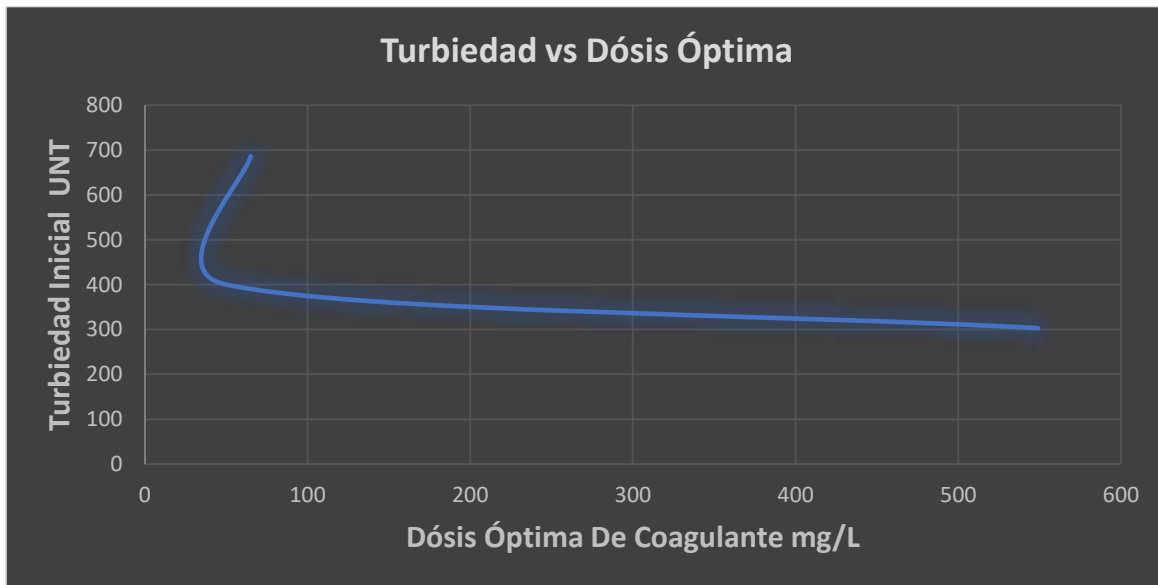


Figura 22. Comportamiento de la turbiedad inicial frente a la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado TIPO A en un rango de 301 a 700 UNT.

3.3. Relación entre condiciones iniciales, dosis óptimas de sulfato de aluminio granulado tipo A y condiciones finales.

En las siguientes tablas se encuentran organizados todos los ensayos realizados con sus respectivas propiedades fisicoquímicas analizadas iniciales, finales y las dosis óptimas encontradas.

Tabla 15

Condiciones iniciales y finales del parámetro analizado con sus respectivas dosis óptimas.

N° DEL ENSAYO	TURBIEDAD (UNT)		DOSIS ÓPTIMA $Al_2(SO_4)_3$ mg/L
	INICIAL	FINAL	
1	24,5	1,77	50
2	5,52	1,84	23
3	272	5,09	49
4	686	3,35	65
5	6,3	1,6	30
6	18,9	3,62	47
7	121	2,12	48
8	8,69	2,10	32
9	288	2,75	68
10	10,8	3,12	32
11	13,7	1,07	37
12	16,1	1,39	44
13	24,2	2,29	45
14	91,5	2,82	38
15	95,2	4,22	40
16	132	2,96	42
17	199	2,72	67
18	30	2,17	36
19	401	4,70	49
20	173	3,07	39
21	183	16,0	63
22	57,3	2,17	38
23	249	4,34	43
24	50,7	3,72	35
25	77,8	3,41	41
26	158	3,22	47
27	303	2,51	549

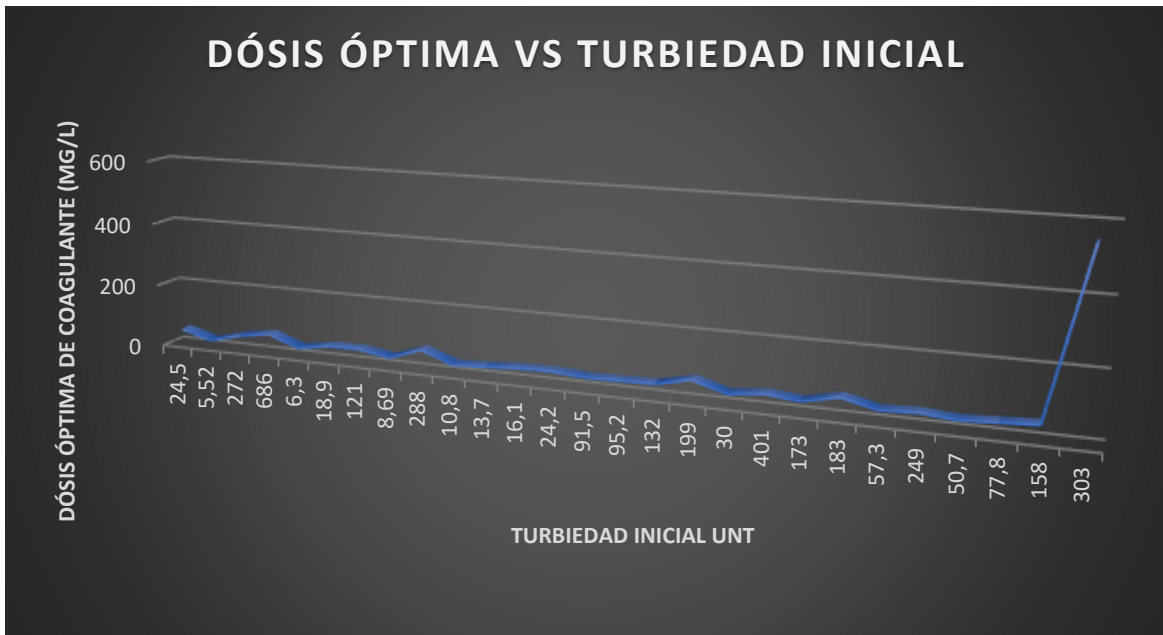


Figura 23. Relación de la dosis óptima de coagulante y la turbiedad inicial

3.4. Porcentajes de remoción del parámetro fisicoquímico con sulfato de aluminio granulado tipo A.

A continuación, se encuentran los porcentajes de remoción de las mejores dosis aplicadas donde el parámetro de turbiedad se encuentra dentro del rango permisible, mediante el ensayo de jarras utilizando sulfato de aluminio granulado tipo A como coagulante.

3.4.1. Remoción de la turbiedad con sulfato de aluminio granulado TIPO A.

Para obtener los porcentajes de remoción se empleó la siguiente relación:

Ecuación 7 Ecuación para la remoción de la turbiedad con sulfato de aluminio granulado TIPO A

$$\% \text{ de remoción Turbiedad} = \frac{\text{Turbiedad Inicial} - \text{Turbiedad Final}}{\text{Turbiedad Inicial}} \times 100$$

Tabla 16

Remoción de Turbiedad.

N° DEL ENSAYO	TURBIEDAD (UNT)		% REMOCIÓN
	INICIAL	FINAL	
1	24,5	1,77	92,78
2	5,52	1,84	66,67
3	272	5,09	98,12
4	686	3,35	99,51
5	6,3	1,6	74,60
6	18,9	3,62	80,84
7	121	2,12	98,24
8	8,69	2,10	75,83
9	288	2,75	99,04
10	10,8	3,12	71,11
11	13,7	1,07	92,19
12	16,1	1,39	91,37
13	24,2	2,29	90,54
14	91,5	2,82	96,92
15	95,2	4,22	95,57
16	132	2,96	97,76
17	199	2,72	98,63
18	30	2,17	92,77
19	401	4,70	98,83
20	173	3,07	98,23
21	183	16,0	91,26
22	57,3	2,17	96,21
23	249	4,34	98,26
24	50,7	3,72	92,66
25	77,8	3,41	95,62
26	158	3,22	97,96
27	303	2,51	99,17

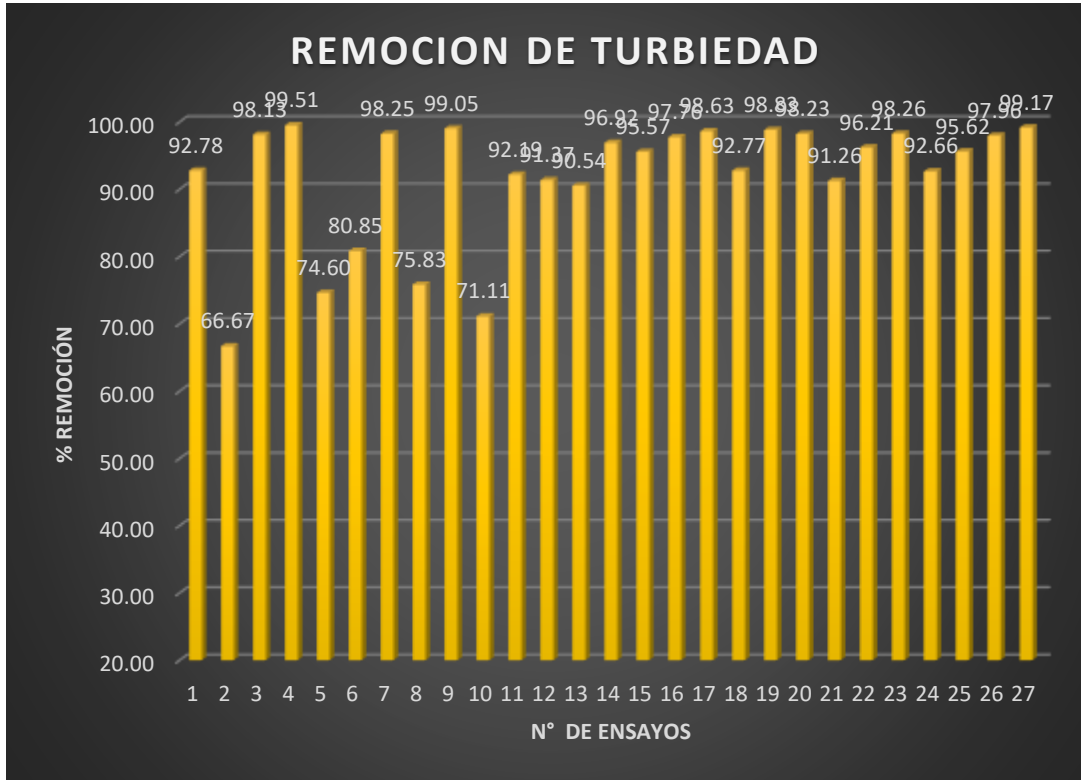


Figura 24. Porcentaje de remoción de la turbiedad

Tabla 19

Coefficiente de correlación de Pearson

	<i>Coefficientes</i>
Intercepción	34,5944484
Turbidez	2,843619565

$$\text{Concentración de floculante} = (2.8436 * \text{Turbidez}) + 34.594$$

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,815632041
Coefficiente de determinación R ²	0,665255626
R ² ajustado	0,658281785
Error típico	1,926302516
Observaciones	27

Interpretación:

En estos resultados, la correlación de Pearson entre turbidez y concentración de floculante es de 0.815, lo que indica que existe una relación positiva moderada entre las variables. esto quiere decir que a medida que la turbidez aumenta, la concentración de floculante también lo hace.

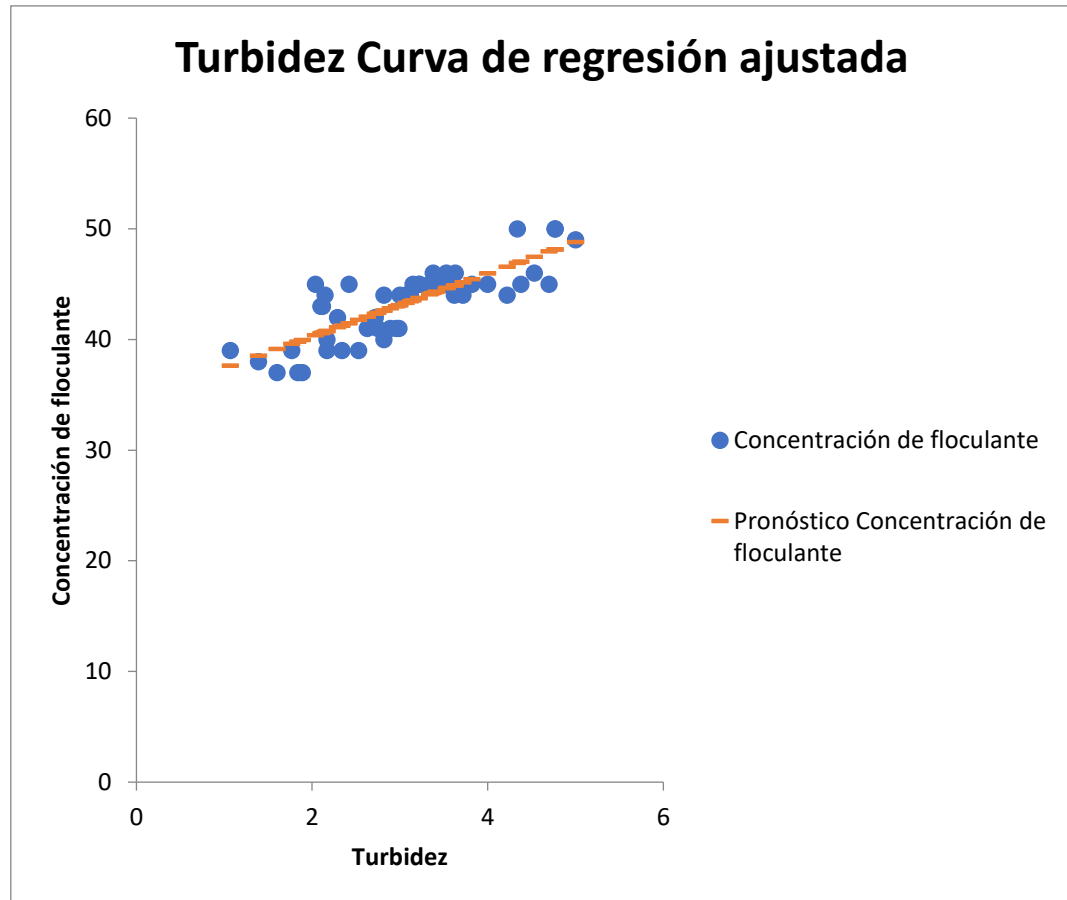


Figura 25. Curva de regresión ajustada

CAPITULO IV.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

Teniendo como referencia los antecedentes que se tomaron en esta investigación, (Betancurt,2012), en el cual uno de los principales problemas son las fluctuaciones de las concentraciones de sulfatos en cortos periodos de tiempo, requiriéndose así de un instrumento que permita tomar decisiones rápidas para modificar la dosis de coagulante a utilizar en el tratamiento con base en un criterio cuantificable; Se pudo observar en los ensayos realizados en diciembre, en el ensayo 1, 2 y 4 se logró obtener unos buenos resultados después del tratamiento con el sulfato de aluminio granulado tipo A, donde los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro del rango que exige el D.S. N° 031-2010-SA /Ministerio de Salud. Dirección General de Salud Ambiental – Lima: Ministerio de Salud; 2011.que la hace apta para el consumo humano.

Durante los meses de enero y febrero, se obtuvieron valores elevados de Ph, debido a una cantidad elevada de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua; estos minerales tienen su origen en las formaciones rocosas calcáreas, abundantes en la zona de toma de parámetros. Estas sales pueden ser encontradas en menor y mayor grado durante los meses de mayores precipitaciones pluviales, en la mayoría de aguas naturales como los ríos a veces

se da como límite para denominar a un agua como dura aquella que presenta una dureza superior a 120 mg CaCO₃/L (Rodríguez,2010, p.6).

Sobre los resultados obtenidos en los ensayos realizados mediante la prueba de jarras, tomando los porcentajes de error de 2 %, según los estudios realizados en Ecuador (Suárez & Trujillo, 2011), en la adecuada evaluación de coagulantes, tanto en concentración como en dosificación; se evidenció que el ensayo 3 no se obtuvieron buenos resultados, ya que no se logró determinar la dosis óptima del coagulante y por lo tanto los parámetros estudiados se encuentran fuera del rango permisible.

En todos los ensayos realizados en el mes de enero se lograron resultados óptimos en cuanto a que los parámetros están dentro del rango.

Se pudo observar en los ensayos realizados en diciembre, que en los ensayos 10 y 11, se logró obtener valores en los parámetros fisicoquímicos analizados del agua permisibles para el consumo humano.

La mayoría de las muestras analizadas durante el mes de marzo arrojaron resultados óptimos en cuanto a que los parámetros estudiados se encuentran dentro del rango permisible de la norma.

El ensayo 21 no arrojó buenos resultados, ya que todas las dosis de sulfato utilizadas no tuvieron un buen efecto sobre la muestra, obteniendo así valores muy por encima del

rango permisible de los parámetros fisicoquímicos. Muy probablemente la dosis óptima se encuentra fuera de los rangos empleados al momento de dosificar el sulfato de aluminio.

Lorenzo & Acosta (2006), en Cuba, estudiaron sobre el “estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación y floculación, abordando conceptos generales del tratamiento de aguas por el método químico de coagulación- floculación .El comportamiento de la dosis óptima frente a la turbiedad debería ser un comportamiento que siga un modelo ya sea lineal, exponencial o logarítmico por el hecho de que a medida que la turbiedad aumenta también lo debería hacer la dosis de coagulante a emplear según la teoría, pero en algunos de los ensayos realizados experimentalmente no se evidencia este comportamiento.

La concentración de sustancias disueltas en el agua varía dependiendo de la localización geográfica y la estación del año. En lo que respecta a componentes activos, los iones calcio y magnesio son dos de los componentes químicos más importantes presentes en las aguas de consumo público y constituyen el mayor porcentaje de lo que se conoce como dureza del agua que influye a la hora del tratamiento (Neira, 2006).

El agua siempre se comporta de una manera diferente debido a las sustancias que pueden venir disueltas en ella lo que altera los parámetros fisicoquímicos de esta y hace que su tratamiento no siempre sea igual y sencillo, además las aguas procedentes de los ríos necesitan un tratamiento complejo y caro antes de ser suministradas a los consumidores,

debido a que las precipitaciones traen cantidades apreciables de materia sólida a la tierra como el polvo, polen, bacterias, esporas, e incluso, organismos mayores.

En los resultados obtenidos se puede observar que en ensayos con turbiedades bajas se requirió mayor dosificación de coagulante que en ensayos con turbiedades altas como por ejemplo, en el ensayo 13 se tiene una turbiedad de 24,2 UNT y una dosis óptima de 45 mg/L mientras que en el ensayo 27 se tiene una turbiedad de 303 UNT y una dosis óptima de 549 mg/L; en el ensayo 6 se tiene una turbiedad de 18,9 UNT y una dosis óptima de 47 mg/L ;mientras que en el ensayo 19 se tiene una turbiedad de 401 UNT y una dosis óptima de 47 mg/L. La mayoría de ensayos siguen este mismo comportamiento, lo que da a evidenciar que muchas veces no es cierto que a mayor turbiedad mayor dosis aplicada de coagulante.

Muchas veces cuando se tienen turbiedades bajas del agua cruda se hace necesario la adición de partículas arcillosas para aumentar la turbiedad y así lograr un mejor tratamiento aumentando el número de colisiones entre las partículas lo que provoca una mejor coagulación.

4.2. Conclusiones

- Se logró determinar la dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio utilizado en el tratamiento de agua potable en la planta de Santa Apolonia-Cajamarca, mejorando la calidad del servicio y proporcionado un ahorro económico para la empresa así mismo

se cumplió con el estándar de Turbiedad según lo establecido en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano D.S. N° 031-2010-S.A. DIGESA.

- Se obtuvo diferentes dosis de coagulante sulfato de aluminio tipo A ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$) a partir de la realización de ensayos utilizando la prueba de jarras en un rango de 23 a 549 mg/L, cumpliendo con la normatividad peruana, a excepción de los ensayos 3 y 21 los cuales no arrojaron buenos resultados, ya que todas las dosis de sulfato utilizadas no tuvieron un buen efecto sobre la muestra, obteniendo así valores muy por encima del rango permisible de los parámetros fisicoquímicos.
- Se logró construir las tablas y graficas donde se relacionan los parámetros fisicoquímicos estudiados y las dosis óptimas de coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo A necesarias, que servirán como parámetro base para el tratamiento de agua potable en la plata de tratamiento Santa Apolonia, mejorando la calidad y servicio.
- Se logró obtener un porcentaje de remoción de turbidez mayor al 95%, siendo el ensayo 17 el de mayor valor; obteniendo una remoción de 99.17%; manteniendo el agua dentro de los parámetros establecidos en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano (D.S. N° 031-2010-S.A. DIGESA).

REFERENCIAS

- Acosta, L. (2006). *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Tercera Edición. Vol. I.
- Campos, C y Bravo, EC. (2013). Técnicas de Inteligencia Computacional Aplicadas a Modelos de Estimación de Coagulante en el Proceso de Potabilización de Agua. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 69 (1): 205-215, 2013. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302013000400017&script=sci_abstract&tlng=es
- Castrillón, D. (2012). *Determinación de la dosis optima de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de villa santana, Tecnólogo Químico* [Tesis de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2012.]. Repositorio institucional: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyanexos/6281622H565.pdf>
- Cogollo, J. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Colombia.
- Donato, N.; Navarro, R.; Ávila, M.; Mendizábal. Obtención de sulfato de quitosano y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de suspensiones coloidales aniónicas de caolinita. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 2006, 7.

Betancurt C., B., Jiménez G., D. M., & Linares, B. G. (2012). Potencial Zeta (Z) como criterio de optimización de dosificación de coagulante en planta de tratamiento de agua potable. *Dyna*, 18-27.

Suárez., & Trujillo. (2011). Diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para la tratabilidad de aguas residuales. Ecuador.

Lorenzo, Y., & Acosta. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación y floculación. Cuba.

FAO. (2014). *AQUASTAT: Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Recuperado el 17 de agosto de 2021 de http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm, http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ecuador/indexesp.stm

Fontanills, LA. (1998). *Una tecnología apropiada para la clarificación de aguas de consumo humano en poblaciones periurbanas y rurales* [Tesis de Maestría]. Repositorio institucional.

GORE (Gobierno Regional de Cajamarca). (2016-2021). Plan de la microcuenca rio San Lucas. Recuperado de: https://siar.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/plan_de_gestion_mcca_rio_san_lucas.pdf

Heddam, S; Bermad, A y Dechemi, N. (2011). Applications of radial-basis function and generalized regression neural networks for modeling of coagulant dosage in a drinking water-treatment plant: comparative study, *Journal of Environmental Engineering*, 137 (1): 1209-1214.

Neira, MA. (2006). *Dureza en Aguas de Consumo Humano y Uso Industrial, Impactos y Medidas de Mitigación [Tesis de Grado, Universidad de Chile]. Repositorio institucional: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104452>*

Pérez, J. (2006). *Avances de sedimentación. Curso sobre Tecnología de Tratamiento de Agua para Países en Desarrollo.*

PRMCAH. (1992). *Programa regional OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano.*

RCACH. (2011). *Elaboración: Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA /Ministerio de Salud. Dirección General de Salud Ambiental – Lima: Ministerio de Salud; 2011.*

Restrepo, HA. (2009). *Evaluación del Proceso de Coagulación – Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2561>*

Rodríguez, C. (1995). *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua* [Tesis

de Grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Santafé de Bogotá].

Repositorio institucional

Rodríguez, S; García, O y Muñoz, R. (2002). *Una solución factible para la clarificación de aguas para consumo humano*. Noticias técnicas de laboratorio.

Romero, JA. (2002). *Calidad del Agua*. Primera Edición, 2002.

SEDACAJ. (2010). Reseña histórica. <https://www.sedacaj.com.pe/nuestra-empresa/historia.html>

SENA. (1999). *Operación de Sistemas de Potabilización de Aguas, código 280201010 norma 3 Monitorear y Ajustar la Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas*.

SENAMHI (SF). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI*

Sibiya, SM. (2014). Evaluation of the streaming current detector (SCD) for coagulation control, *Procedia Engineering*, 1: (70) 1211-1220.

Water, P. (1983). Inhibition of flocculation processes in systems containing organic matter. 55 (7): 947 – 957.

https://quimica.unmsm.edu.pe/pdf/ing%20loayza/BOLETIN_51.pdf

ANEXOS

Anexo 1 (Matriz de consistencia)

Título	Problema	Objetivos	Hipótesis	Dimensiones	Indicadores	Metodología
<p>Dosis optima y eficiencia del coagulante sulfato de aluminio utilizado en el proceso de floculación para el tratamiento de agua potable en la EPS SEDACAJ S. A</p>	<p>General</p> <p>¿Cuál debe ser la dosis óptima de sulfato de aluminio a utilizar en el tratamiento de agua potable en la planta Santa Apolonia-Cajamarca, de manera que el parámetro de turbiedad a la salida de la Planta de Tratamiento Santa Apolonia esté dentro de lo establecido en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano (D.S. N° 031-2010-S.A. DIGESA)?</p>	<p>General</p> <p>Determinar la dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio en el tratamiento de agua potable en la planta de Santa Apolonia-Cajamarca de manera que se cumpla con el estándar de Turbiedad según lo establecido en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano D.S. N° 031-2010-S.A. DIGESA.</p> <p>Específicos</p> <p>Obtener diferentes dosis de coagulante sulfato de aluminio tipo A (Al₂(SO₄)₃ 18H₂O) de acuerdo a el parámetro de turbidez del agua cruda mediante la realización de ensayos utilizando la prueba de jarras.</p> <p>Establecer la dosificación de coagulante y relacionarlo con el parámetro analizado mediante la construcción de sus respectivas tablas y gráficas.</p> <p>Mantener el agua dentro de los parámetros establecidos en el Reglamento de Calidad para Agua de Consumo Humano (D.S. N° 031-2010-S.A. DIGESA).</p>	<p>General</p> <p>La dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio utilizado en el tratamiento de aguas de origen superficial, con valores iniciales de turbidez menores a 700 UNT; alcanza una efectividad mayor al 95% en la remoción de turbiedad.</p> <p>Específicas</p> <p>La dosis óptima de coagulante sulfato de aluminio utilizado en el tratamiento de agua potable se encuentra en el rango de 50-600 mg/L, dependiendo de la turbiedad inicial.</p> <p>Al aplicar las dosis optimas establecidas según el parámetro de turbiedad presente en el agua cruda, se obtendrá una eficiencia de remoción, con valores mayores del 50% y cercanos al 100%, mejorando la calidad de servicio de la planta de tratamiento.</p>	<p>Turbiedad</p> <p>Sulfato de aluminio tipo A (Al₂(SO₄)₃. 14H₂O)</p>	<p>UNT</p> <p>mg/l</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>Experimental</p> <p>Nivel de investigación</p> <p>Correlacional con experimento puro.</p> <p>Diseño de la investigación</p> <p>Diseño experimental verdadero</p> <p>Técnica de investigación de datos</p> <p>PROTOCOLO DE MONITOREO DE LA CALIDAD SANITARIA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES-DIGESA</p> <p>Prueba de jarras realizada en laboratorio de control de calidad de SEDACAJ S. A</p>

Anexo 2 (Operacionalización de variables)

VARIABLES		OPERALIZACION DE VARIABLES	UNIDAD DE MEDIDA	INSTRUMENTO DE MEDICION
		DEFINICION CONCEPTUAL		
INDEPENDIENTE	Cantidad de coagulante	<i>Es la cantidad de coagulante utilizado para desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, La coagulación es el tratamiento mas eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Se mide de acuerdo a diferentes turbiedades que presente el agua cruda; dicha medición se realiza en relación a los ensayos de prueba de jarras.</i>	mg/l	EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS
DEPENDIENTE	Turbiedad	<i>La turbidez es la dificultad del agua, para trasmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos, que se presentan principalmente en aguas superficiales. Son difíciles de decantar y filtrar, y pueden dar lugar a la formación de depósitos en las conducciones de agua, equipos de proceso, etc. Además interfiere con la mayoría de procesos a que se pueda destinar el agua.La medición se realiza en la planta de de tratamiento Santa Apolonia empleando el turbilimetro.</i>	UNT(unidades nefelométricas de turbiedad)	TURBILIMETRO

Anexo 3 (Reportes de análisis Agua)



REPORTE DE ANALISIS DE AGUA

SOLICITA: César Velásquez Cachay

MUESTRA: Agua Cruda del Rio Ronquillo	ANÁLISIS N°: 212
LUGAR: Laboratorio de Control de Calidad	MUESTREADO: César Velásquez Cachay
DISTRITO: Cajamarca	REGIÓN: Cajamarca
PROVINCIA: Cajamarca	

MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

MES DE DICIEMBRE

N°	TURBIEDAD INICIAL	TURBIEDAD FINAL	COLOR	pH
MUESTRA 1	24,5	1,77	234	8,78
MUESTRA 2	5,52	1,84	68	7,88
MUESTRA 3	272	5,09	1545	7,9
MUESTRA 4	686	3,35	4475	8,14



Ing. Alfredo Chávez Álvarez
Jefe del Oficina de Control de Calidad
E.P.S. SEDACAJ S.A.



REPORTE DE ANALISIS DE AGUA

SOLICITA: César Velásquez Cachay

MUESTRA: Agua Cruda del Rio Ronquillo	ANÁLISIS N°: 213
LUGAR: Laboratorio de Control de Calidad	MUESTREADO: César Velásquez Cachay
DISTRITO: Cajamarca	REGIÓN: Cajamarca
PROVINCIA: Cajamarca	

MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

MES DE ENERO

N°	TURBIEDAD INICIAL	TURBIEDAD FINAL	COLOR	pH
MUESTRA 5	6,3	1,6	77	8,7
MUESTRA 6	18,9	3,62	204	7,68
MUESTRA 7	121	2,12	892	9,01
MUESTRA 8	8,69	2,10	78	9,22
MUESTRA 9	288	2,75	2060	9,37



Ing. Alfredo Chávez Álvarez
Jefe del Oficina de Control de Calidad
EPS SEDACAJ S.A.



REPORTE DE ANALISIS DE AGUA

SOLICITA: César Velásquez Cachay

MUESTRA: Agua Cruda del Río Ronquillo	ANÁLISIS N°: 214
LUGAR: Laboratorio de Control de Calidad	MUESTREADO: César Velásquez Cachay
DISTRITO: Cajamarca	REGIÓN: Cajamarca
PROVINCIA: Cajamarca	

MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

MES DE FEBRERO

N°	TURBIEDAD INICIAL	TURBIEDAD FINAL	COLOR	pH
MUESTRA 10	10,8	3,12	114	9,51
MUESTRA 11	13,7	1,07	143	9,0



ING. Alfredo Chávez Alvaroz
Jefe (a cargo) de Control de Calidad
E.P.S. SEDACAJ S.A.



REPORTE DE ANALISIS DE AGUA

SOLICITA: César Velásquez Cachay

MUESTRA: Agua Cruda del Rio Ronquillo	ANÁLISIS N°: 215
LUGAR: Laboratorio de Control de Calidad	MUESTREADO: César Velásquez Cachay
DISTRITO: Cajamarca	REGIÓN: Cajamarca
PROVINCIA: Cajamarca	

MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

MES DE MARZO

N°	TURBIEDAD INICIAL	TURBIEDAD FINAL	COLOR	pH
MUESTRA 12	16,1	1,39	134	8,42
MUESTRA 13	24,2	2,29	157	8,33
MUESTRA 14	91,5	2,82	1052	7,66
MUESTRA 15	95,2	4,22	794	8,51
MUESTRA 16	132	2,96	1098	8,51
MUESTRA 17	199	2,72	1300	7,66
MUESTRA 18	30	2,17	259	7,58
MUESTRA 19	401	4,70	3320	7,39
MUESTRA 20	173	3,07	1000	8,23
MUESTRA 21	183	16,0	1760	8,9
MUESTRA 22	57,3	2,17	483	8,68
MUESTRA 23	249	4,34	1930	8,41
MUESTRA 24	50,7	3,72	367	8,57
MUESTRA 25	77,8	3,41	514	8,54
MUESTRA 26	158	3,22	1920	8,57
MUESTRA 27	303	2,51	2440	8,32



Ing. Alberto Chávica Alvarez
Jefe del Centro de Control de Calidad
E.P.S. SEDACAJ S.A.

Anexo 4 (Constancia de ensayos de Laboratorio)



CONSTANCIA DE ENSAYOS EN LABORATORIO

Cajamarca, 18 de Agosto de 2021

A quien corresponda:

El que suscribe, Jefe de la Oficina de Control de Calidad de la Empresa Prestadora de Saneamiento de Cajamarca Sociedad Anónima, hace constar que el señor

CÉSAR ANTONIO VELÁSQUEZ CACHAY

Ha asistido a las instalaciones de nuestros laboratorios de control de calidad de agua, con la finalidad de realizar ensayos con el equipo de prueba de jarras, utilizando como matriz de ensayo, muestras de agua.

Dichos ensayos se ha llevado a cabo durante el periodo de Diciembre 2020 a Marzo 2021.

Se expide el presente a petición del interesado y para los usos que el mismo convenga.

Atentamente,



Alfredo
Ing. Alfredo Chávez Álvarez
Jefe (e) Oficina de Control
de Calidad
EPS. SEDACAJ S.A.



OFICINA PRINCIPAL
● Jr. Cruz de Nieva N° 153
● sedaco@sedaco.com.pe
● 074-363560

OFICINA COMERCIAL
● Av. Perú N° 658
● C.C. El Quinde - 2do Nivel
● 074-387952

Anexo 5 (Preparación de muestras para ensayos de prueba de jarras en el laboratorio)



Anexo 6 (Turbidímetro)

Marca	Modelo	Serie
HACH	2100Q	15040C040841

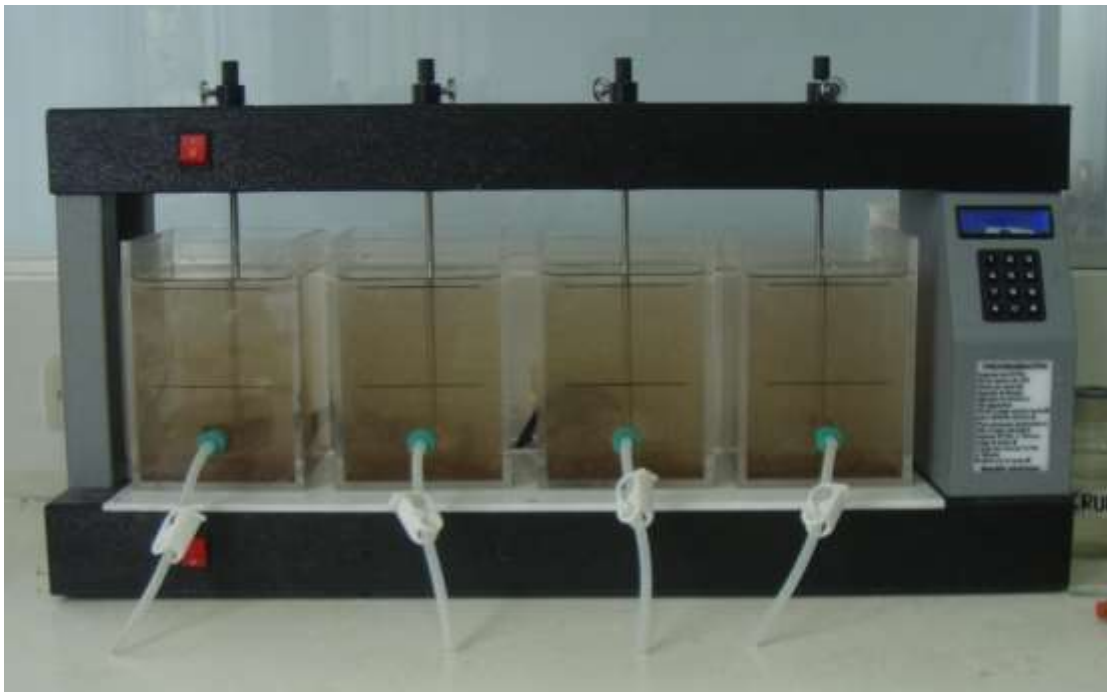


Anexo 7 (Multiparámetro)

Marca	Modelo	Serie
HACH	HQ1110	211521110029



Anexo 8 (Equipo de jarras)



Anexo 9 (Toma de datos de campo-Rio Ronquillo)





Dosis óptima y eficiencia del coagulante sulfato de aluminio utilizado en el proceso de floculación para el tratamiento de agua potable en la EPS SEDACAJ S.A.

MINISTERIO DE SALUD
Dirección General de Salud Ambiental DIGESA

ANEX
ON° I

FICHA DE REGISTRO DE DATOS DE CAMPO
PROGRAMA DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HIDRICOS

Rio LONGUILLO

DESA: MUESTRAS PARA ESTUDIO

N° Estación	Origen de la Fuente	Descripción del Punto de Muestreo	Localidad	Distrito	Provincia	Departamento	Fecha y Hora de Muestreo	T °C	pH	STD mg/L	OD mg/L	Conductividad µmhos/cm	Coordenadas UTM		Observaciones
													Este	Norte	
4	Natural - Superficial	Agua cruda del punto de floculación	CAT	CAT	CAT	CAT	10/25/21 09:00/21	17.3	8.9	9.8	237, 84	72050	92000	/	

CATAMARCA 02 de MARZO del 2021


CÉSAR ANTONIO VELÁSQUEZ CACHAY
(Nombre y Apellidos)
Responsable de la Vigilancia de la Calidad de los Recursos Hídricos

Anexo 11 (Ficha de calibración del turbidímetro)

	INFORME DE MANTENIMIENTO	Código: F-DMA-205 Versión: 03 Fecha: 13/01/2020			
1. INFORME					
N° Informe	: MT-003-2021				
Fecha de Informe	: 2021-04-08				
2. DATOS DEL EQUIPO					
Instrumento de Medición	: TURBIDIMETRO				
Marca	: HACH				
Modelo	: 2100Q				
N° Serie	: 15040C040841				
Código interno	: ELAB-2733				
3. LUGAR DEL MANTENIMIENTO					
Área de Instrumentación - División Medio Ambiente	Av. Elmer Faucett N° 464 - Callao				
4. TIPO DE MANTENIMIENTO					
Mantenimiento Preventivo:	<input checked="" type="checkbox"/>	Mantenimiento Correctivo: <input type="checkbox"/>			
5. ESTADO INICIAL					
Descripción	Estado	Observación			
Operativa	Operativa	-			
Acción técnica	Operativa	-			
Solución de verificación	Operativa	-			
Solución de ajuste	Operativa	-			
6. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO					
Se procedió a la limpieza externa del equipo, Se realizó las pruebas de funcionamiento con sus respectivos estándares de turbidez, el equipo paso satisfactoriamente las tolerancias establecidas.					
7. CONCLUSIONES					
El equipo se encuentra operativo.					
Equipo Operativo	<input checked="" type="checkbox"/>	Equipo Fuera de Servicio <input type="checkbox"/>			
Fecha de Emisión: 2021-04-08 Realizado Por:  RALDO URBINARTE SIMON Asesor de Instrumentación División Medio Ambiente Inspectorate Services Perú SAC. a Bureau Veritas Group Company	Revisado Por:  Edson José Salazar Cruz Coordinador de Instrumentación División Medio Ambiente Inspectorate Services Perú SAC. a Bureau Veritas Group Company Información proporcionada por: <table border="1" style="font-size: x-small; margin-left: 20px;"> <tr> <td>Operativa</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Inspección</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Operativa	<input checked="" type="checkbox"/>	Inspección	<input type="checkbox"/>
Operativa	<input checked="" type="checkbox"/>				
Inspección	<input type="checkbox"/>				

F-DMA-205

Anexo 12 (Ficha de calibración del multiparámetro)

VERIFICACIÓN OPERACIONAL DE MULTIPARÁMETROS		Código: F-GMA-028 Versión: 02 Fecha: 13/01/2020				
N° Certificado	: VM-163-2021	Pág. 1 de 1				
Fecha de Verificación	: 2021-09-22					
1. DATOS DEL EQUIPO						
Instrumento de Medición	: MULTIPARAMETRO					
Marca	: HACH					
Modelo	: HD1110					
Serie del Instrumento	: 21152110030					
Serie de la Sonda	: pH - 011722581088					
Código Interno	: ELAB-5374					
Parámetro	: Temperatura					
Rango	: 0 - 90 °C (pH) / 18 - 118 °C (CE) / 0 - 90 °C (CE)					
Resolución	: 0,1 °C					
Exactitud	: ±0,3 °C					
2. LUGAR DE VERIFICACIÓN						
Área de Instrumentación - División Medio Ambiente		Av. Elmer Faucet # 444 - Callao				
3. DOCUMENTOS DE REFERENCIA APLICADO						
F-GMA-022 "Verificación de Multiparámetros"						
4. CONDICIONES AMBIENTALES						
Código Termoprogresivo	: ELAB-4478					
Temperatura Ambiental	Inicial: 20,8 °C	Final: 20,9 °C				
Humedad relativa ambiental	Inicial: 67,1%	Final: 68,7%				
5. MATERIALES PATRONES DE REFERENCIA						
Patrón de Control Interno	Código Interno	Número de Certificado	Fecha de Calibración			
Temperatura	ELAB-3326	CICP-0188-001-2	2021-03-22			
6. RESULTADOS						
Sensor	T.C.V ¹	Indicación del Instrumento	Unidad	Error	Tolerancia	Conformidad ²
pH	18,58	18,0	°C	0,06	±0,5	C
7. OBSERVACIONES						
Los resultados del presente documento son válidos únicamente para el equipo y para el instrumento utilizado.						
¹ Temperatura Convencionalmente Verdadera (T.C.V.) = Indicación del termómetro + Corrección.						
² C: Conforme, NC: No Conforme.						
Fecha de emisión: 2021-09-22						
Realizado por:		Revisado por:				
Aldo Cachaquero Gómez Asesor de Instrumentación División Medio Ambiente Inspectorate Services Perú SAC a Bureau Veritas Group Company		Edson Sosa Salazar Coordinador de Instrumentación División Medio Ambiente Inspectorate Services Perú SAC a Bureau Veritas Group Company				
		<table border="1"> <tr> <td>Elaborado</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Revisado</td> <td>X</td> </tr> </table>	Elaborado		Revisado	X
Elaborado						
Revisado	X					