

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS DE AGUA  
Y TIERRA**



**DOSIFICACIÓN DE COAGULANTES Y FLOCULANTES PARA LA  
REMOCIÓN DE SEDIMENTOS DEL AGUA EN EL EMBALSE  
CUCHOQUESERA ,AYACUCHO**

**Presentada por:**

**JUAN CHARAPAQUI ANCCASI**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGÍSTER SCIENTIAE EN  
INGENIERÍA DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA**

**Lima, Perú**

**2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA**

**DOSIFICACIÓN DE COAGULANTES Y FLOCULANTES PARA LA  
REMOCIÓN DE SEDIMENTOS DEL AGUA EN EL EMBALSE  
CUCHOQUESERA, AYACUCHO**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGÍSTER SCIENTIAE EN  
INGENIERÍA DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA**

**Presentada por:  
JUAN CHARAPAQUI ANCCASI**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

**Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva  
PRESIDENTE**

**Mg.Sc. Gonzalo Fano Miranda  
ASESOR**

**Mg.Sc. Toribio Santayana Vela  
MIEMBRO**

**Mg.Sc. Ricardo Apacla Nalvarte  
MIEMBRO**

**Lima - Perú**

**2019**

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional Agraria La Molina, por mostrarme el espíritu universitario y acogerme dentro de esta máxima casa de estudios.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina, quienes con sus enseñanzas y sabios consejos guiaron mi formación.

Al CONCYTEC, por la beca otorgada para realizar los estudios de Maestría en Ingeniería de Recursos Hídricos, culminados con esta Tesis.

Al Mg.Sc. Gonzalo Fano Miranda, por su valioso apoyo incondicional en calidad de asesor de la presente tesis.

A la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina por brindarme las instalaciones y medios para llevar a cabo los análisis de calidad del agua.

Al Gobierno Regional de Ayacucho, Gerencia Regional de Infraestructura, Operación y Mantenimiento del Sistema Hidráulico Cachi “OPEMAN”; campamento presa Cuchoquesera, por permitirme hacer uso de sus instalaciones y medios para llevar a cabo el trabajo de campo.

## **DEDICATORIA**

Con el más inmenso amor, cariño, admiración, respeto y gratitud a mis padres Sr. Pablo Charapaqui Punilla y la Sra. Dionisia Anccasi Huamán, por haberme dado la vida, valores y apoyo incondicional. A Alicia por su constante aliento; a mis hijos Juan Eduardo y Mattias Pablo, por brindarme parte de su valioso tiempo; a todos mis hermanos, hermanas, sobrinos y sobrinas por haberme brindado su apoyo incondicional; ustedes, han sido un pilar fundamental en el logro de esta meta.

# ÍNDICE GENERAL

|   |           |
|---|-----------|
| <b>I. INTRODUCCION</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>1.1 GENERALIDADES</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>1.2 OBJETIVOS</b> .....  | <b>3</b>  |
| 1.2.1 Objetivo general.....   | 3         |
| 1.2.2 Objetivos especificos.....  | 3         |
| <b>II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>2.1 AGUA POTABLE</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>2.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y ELÉCTRICAS DE LAS PARTÍCULAS<br/>        EN EL AGUA</b> ..... | <b>4</b>  |
| <b>2.3 MATERIA ORGÁNICA</b> .....   | <b>5</b>  |
| 2.3.1 Materia orgánica natural.....   | 5         |
| <b>2.4 COMPUESTOS ORGÁNICOS SINTÉTICOS</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>2.5 COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN</b> .....  | <b>9</b>  |
| 2.5.1 Teoría de la coagulación y floculación.....   | 9         |
| 2.5.2 Mecanismos de coagulación y floculación.....  | 10        |
| 2.5.3 Factores que influyen en el proceso de coagulación-floculación.....                         | 11        |
| 2.5.4 Reactivos utilizados para coagulación – floculación.....                                    | 14        |
| <b>2.6 SEDIMENTACIÓN</b> .....  | <b>20</b> |
| 2.6.1 Partículas sedimentables.....   | 20        |
| 2.6.2 Partículas no sedimentables.....  | 21        |
| <b>2.7 PRUEBA DE JARRAS PARA EVALUAR COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN</b> .....                          | <b>23</b> |
| <b>2.8 DISEÑO DE EXPERIMENTOS</b> .....   | <b>25</b> |
| 2.8.1 Diseño factorial.....   | 28        |
| 2.8.2 Diseño central compuesto.....   | 30        |
| <b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....  | <b>34</b> |
| <b>3.1 ZONA DE ESTUDIO</b> .....  | <b>34</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.1.1 Aspectos generales del embalse .....   | 34        |
| 3.1.2 Ubicación .....  | 34        |
| 3.1.3 Características de la zona de estudio.....   | 34        |
| 3.1.4 Aspectos técnicos de diseño del embalse .....  | 36        |
| <b>3.2 MATERIALES Y REACTIVOS .....</b>  | <b>37</b> |
| 3.2.1 Materiales .....   | 38        |
| <b>3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>   | <b>39</b> |
| 3.3.1 Diseño de investigación – nivel de investigación.....                                | 39        |
| 3.3.2 Variables e indicadores .....  | 39        |
| 3.3.3 Población y muestra .....  | 39        |
| <b>3.4 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AGUA.....</b>                    | <b>40</b> |
| 3.4.1 Determinación de la turbidez .....   | 40        |
| 3.4.2 Color.....   | 41        |
| 3.4.3 Volumen de lodos.....  | 41        |
| 3.4.4 Determinación de pH .....  | 42        |
| 3.4.5 Partículas no sedimentables .....  | 42        |
| 3.4.6 Conductividad eléctrica.....   | 43        |
| <b>3.5 PRECIPITACIÓN .....</b>   | <b>43</b> |
| <b>3.6 PRUEBA DE JARRAS DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.....</b>                    | <b>43</b> |
| 3.6.1 Diseño de experimentos .....   | 44        |
| <b>3.7 TÉCNICAS ANALÍTICAS.....</b>  | <b>46</b> |
| <b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>4.1 VARIABILIDAD DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AGUA<br/>DEL EMBALSE.....</b> | <b>48</b> |
| 4.1.1 pH.....  | 48        |
| 4.1.2 Conductividad eléctrica.....   | 49        |
| 4.1.3 Volumen de lodos.....  | 49        |
| 4.1.4 Sólidos disueltos y suspendidos .....  | 50        |
| 4.1.5 Color.....   | 50        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.1.6 Turbidez .....   | 51        |
| <b>4.2 PRECIPITACIÓN .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>4.3 COMBINACIÓN Y DOSIS ÓPTIMAS DE COAGULANTE-FLOCULANTE.....</b>                                     | <b>52</b> |
| 4.3.1 Pruebas de jarras del proceso de coagulación-floculación en época de lluvias .....                 | 52        |
| 4.3.2 Concentraciones de clorofila-a en la época de estiaje .....  | 66        |
| <b>4.4 ANÁLISIS DEL COSTO DE TRATAMIENTO DE LAS COMBINACIONES DE<br/>COAGULANTES Y FLOCULANTES .....</b> | <b>67</b> |
| 4.4.1 Evaluación de la factibilidad técnica y económica.....   | 67        |
| <b>V. CONCLUSIONES .....</b>   | <b>75</b> |
| <b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>76</b> |
| <b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>76</b> |
| <b>VIII. ANEXOS.....</b>   | <b>82</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Procesos de la prueba de jarras .....   | 24 |
| Figura 2. Equipo clásico para la realización de la prueba de jarras .....                   | 25 |
| Figura 3. Esquema general de un proceso o sistema.....                                      | 27 |
| Figura 4. Interacción de los factores $X_1$ y $X_2$ sobre la respuesta.....                 | 28 |
| Figura 5. Representación de un DCC .....  | 31 |
| Figura 6. Mapa de ubicación del embalse Cuchoquesera.....                                   | 35 |
| Figura 7. Características de la zona de estudio .....                                       | 36 |
| Figura 8. Procedimiento de preparación de una muestra de agua utilizada en las pruebas..    | 47 |
| Figura 9. Potencial de hidrogeno en las estaciones de muestreo.....                         | 48 |
| Figura 10. Conductividad eléctrica del agua en las estaciones de muestreo.....              | 49 |
| Figura 11. Volumen de lodos en el agua en las estaciones de muestreo.....                   | 50 |
| Figura 12. Partículas no sedimentables en el agua en las estaciones de muestreo .....       | 50 |
| Figura 13. Color aparente en el agua en las estaciones de muestreo.....                     | 51 |
| Figura 14. Turbidez del agua en las estaciones de muestreo.....                             | 51 |
| Figura 15. Turbidez del agua para diferentes dosificaciones de coagulantes y floculantes... | 54 |
| Figura 16. Color del agua para diferentes dosificaciones de coagulantes y floculantes.....  | 56 |
| Figura 17. Volumen de lodos en el agua para diferentes dosificaciones de coagulantes....    | 56 |
| Figura 18. Partículas no sedimentadas en agua para diferentes dosificaciones.....           | 57 |
| Figura 19. pH del agua para diferentes dosificaciones de coagulantes y floculantes.....     | 58 |
| Figura 20. Precipitación en el periodo 8/03/2018 – 24/03/2018.....                          | 82 |
| Figura 21. Precipitación en el periodo 5/04/2018 – 16/04/2018.....                          | 82 |
| Figura 22. Precipitación en el periodo 19/04/2018 – 14/05/2018.....                         | 82 |
| Figura 23. Turbidez en la P.T. Quicapata (2016-2017).....                                   | 83 |
| Figura 24. Representación panorámica de las aguas del embalse Cuchoquesera .....            | 85 |
| Figura 25. Proceso de obtención del polvo de tuna .....                                     | 85 |
| Figura 26. Polvo de tuna.....   | 86 |
| Figura 27. Resultados en cono de Imoff.....   | 86 |
| Figura 28. Prueba de jarras .....   | 87 |
| Figura 29. Afluente del rio Cachi al embalse Cuchoquesera .....                             | 87 |
| Figura 30. Aguas en el embalse Cuchoquesera.....  | 87 |
| Figura 31. Esquema hidráulico del embalse Cuchoquesera.....                                 | 88 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Resumen de procesos para la remoción de materia orgánica natural .....   | 8  |
| Tabla 2. Polímeros naturales que tienen propiedades coagulantes o floculantes .....   | 9  |
| Tabla 3. Modificadores de pH .....  | 12 |
| Tabla 4. Coagulantes metálicos .....  | 18 |
| Tabla 5. Clasificación de los polímeros orgánicos por su peso molecular, dosis y<br>usos más frecuentes .....   | 20 |
| Tabla 6. Relación modelo-diseño experimental .....  | 33 |
| Tabla 7. Aspectos técnicos de diseño del embalse Cuchoquesera .....   | 37 |
| Tabla 8. Estaciones de muestreo de agua.....  | 37 |
| Tabla 9. Matriz experimental codificada del DCC, para las pruebas de coagulación-<br>floculación del agua cruda del embalse Cuchoquesera .....                    | 45 |
| Tabla 10. Valores codificados y reales de los factores empleados en el DCC, para las<br>pruebas de coagulación-floculación del agua del embalse Cuchoquesera..... | 46 |
| Tabla 11. Técnicas utilizadas para la determinación de los parámetros fisicoquímicos ....   | 47 |
| Tabla 12. Valores promedio de variables medidas .....   | 48 |
| Tabla 13. Matriz experimental del DCC; combinación del sulfato de aluminio<br>(coagulante) y goma de tara (floculante) .....                                      | 53 |
| Tabla 14. Matriz experimental del DCC; combinación del sulfato de aluminio<br>(coagulante) - tuna (floculante) .....  | 54 |
| Tabla 15. Matriz experimental del DCC; combinación del sulfato ferroso (coagulante) -<br>goma de tara (floculante) .....  | 55 |
| Tabla 16. Matriz experimental del DCC; combinación del sulfato ferroso (coagulante) -<br>tuna (floculante) .....  | 57 |
| Tabla 17. Matriz experimental del DCC; combinación del cloruro férrico (coagulante) -<br>tuna (floculante) .....  | 58 |
| Tabla 18. Matriz experimental del DCC; combinación del cloruro férrico<br>(coagulante) - goma de tara (floculante).....   | 59 |
| Tabla 19. Tiempos y velocidades de agitación en las pruebas de coagulación -<br>floculación .....   | 59 |
| Tabla 20. Resultados experimentales de las variables de respuesta de las<br>combinaciones coagulante-floculante .....   | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 21. Valores de coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y de falta de ajuste para las variables de respuesta de las combinaciones de coagulante-floculante ..... | 62 |
| Tabla 22. ANOVA para las combinaciones de coagulante-floculante .....  | 63 |
| Tabla 23. Valores óptimos de dosis para las combinaciones de coagulante-floculante para tratar agua del embalse Cuchoquesera.....                                  | 66 |
| Tabla 24. Resultados experimentales de la presencia de la Clorofila-a .....  | 66 |
| Tabla 25. Resultados de la factibilidad técnica por el método de MDM para las seis combinaciones de coagulante-floculante .....                                    | 72 |
| Tabla 26. Resultados de la factibilidad económica por el método de MDM para las seis combinaciones de coagulante – floculante .....                                | 73 |
| Tabla 27. Análisis de costo de tratamiento de agua .....   | 74 |
| Tabla 28. Sustancias químicas usadas para la coagulación .....   | 84 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|  |    |
|--|----|
| ANEXO 1: PRECIPITACION EN EL EMBALSE CUCHOQUESERA .....      | 82 |
| ANEXO 2: TURBIDEZ EN LA P.T. QUICAPATA.....                  | 83 |
| ANEXO 3: SUSTANCIAS QUÍMICAS USADAS PARA LA COAGULACIÓN..... | 84 |
| ANEXO 4: FOTOGRAFÍAS.....                                    | 85 |
| ANEXO 5: ESQUEMA HIDRÁULICO DEL EMBALSE CUCHOQUESERA.....    | 88 |
| ANEXO 6: PLANOS.....   | 89 |

## ABREVIATURAS

|                              |   |
|------------------------------|---|
| $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | Sulfato de aluminio                             |
| ANOVA                        | Análisis de varianza                            |
| CL-a                         | Clorofila-a                                     |
| COAG                         | Dosis de coagulante                             |
| COT                          | Carbono orgánico total                          |
| DCC                          | Diseño central compuesto                        |
| DDE                          | Diseño de experimentos                          |
| MIB                          | Metilisoborneol                                 |
| MON                          | Materia orgánica natural                        |
| MSR                          | Metodología de superficie de respuesta          |
| NOM                          | Materia orgánica natural                        |
| PACl                         | Policloruro de aluminio                         |
| pH                           | Potencial de hidrógeno                          |
| PPQ                          | Planta potabilizadora Quicapata                 |
| rT                           | Turbiedad residual                              |
| rpm                          | Revoluciones por minuto                         |
| SA                           | Sulfato de aluminio                             |
| SPD                          | Subproductos de la desinfección                 |
| SST                          | Sólidos suspendidos totales                     |
| SUVA                         | Absorbancia ultravioleta específica (UV254/COD) |
| TURB                         | Nivel de turbiedad inicial                      |
| U Pt-Co                      | Unidades de color platino-cobalto               |
| USD                          | Dólar americano                                 |
| UTN                          | Unidades de turbiedad nefelométrías             |
| UV                           | Ultravioleta                                    |
| VL                           | Volumen de lodos                                |

## RESUMEN

La remoción de sedimentos es muy importante en la potabilización de agua, por razones estéticas y su asociación con problemas de olor y sabor. El monitoreo de calidad de agua se realizó de febrero a agosto del 2018, y se establecieron cuatro estaciones de muestreo dispuestas en el embalse Cuchoquesera. Los parámetros medidos fueron, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH, color, turbidez y volumen de lodos. Los resultados indican que todos los parámetros estudiados sobrepasan los límites establecidos, con excepción de conductividad eléctrica ( $190 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) y sólidos disueltos totales ( $255 \text{ mg}/\text{L}$ ). Se determinó la mejor combinación y dosis óptimas de reactivos que permitieron remover los sedimentos de las aguas del embalse Cuchoquesera, mediante procesos fisicoquímicos, para lo cual se estudiaron los procesos de coagulación-floculación. Para la mejora del proceso de coagulación-floculación en la época de lluvias, se evaluaron seis combinaciones de reactivos, formadas por tres coagulantes (cloruro férrico, sulfato ferroso y sulfato de aluminio), y dos floculantes naturales polvo de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) y goma de tara (*Caesalpinia spinosa*), respectivamente. Para cada combinación de reactivos, se desarrollaron pruebas de jarras siguiendo el diseño experimental central compuesto (DCC), donde los factores de diseño fueron las dosis de coagulante y floculante, y la turbiedad inicial. Se obtuvieron modelos matemáticos ajustados a los resultados, habiéndose determinado las dosis óptimas de reactivos y los valores finales de las variables de respuesta, para tratar el agua cruda del embalse Cuchoquesera, con 150 UTN y 137 U Pt-Co, el coagulante sulfato de aluminio ( $27,9 \text{ mg}/\text{L}$ ) en combinación con un floculante natural goma de tara ( $3 \text{ mg}/\text{L}$ ) se obtuvo valores residuales de 1,7 UTN y 3,2 U Pt-Co, respectivamente. El costo estimado para la combinación, considerando las dosis de reactivos fue de  $0,22 \text{ USD}/\text{m}^3$ . En la época de estiaje el objetivo fue remover algas y/o clorofila-a (pigmento presente en las algas); no habiéndose encontrado en el agua.

**Palabras clave:** sulfato de aluminio, ensayo de jarras, turbidez, coagulación, floculación.

## ABSTRACT

The removals of sediments are very important, in the water clarification process, for esthetic reasons and relation with taste and odor compounds. The freshwater quality monitoring is carried out from February to August 2018, and four sampling stations were set up disposed in Cuchoquesera reservoir. Parameters measured were, electrical conductivity, total dissolved solids, pH, color, turbidity and sludge volume. The results indicate that all parameters studied exceed the established limits, except for electrical conductivity (190  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) and total dissolved solids (255 mg/L). It was to determine the best coagulant and flocculant combination in addition to their optimal dosages in order to evaluate sediments removal from Cuchoquesera reservoir water by physicochemical processes. Coagulation (during rainy season) were evaluated (ferric chloride, ferrous sulfate and aluminum sulfate) as coagulants; and two natural flocculants of tuna's powder (*Opuntia ficus indica*), of tara gum (*Caesalpinia spinosa*). For each coagulant-flocculant combination, jar tests were carried out at the same mixing conditions and by following a central composite design (CCD), which design factors, were the coagulant and flocculant doses, and initial turbidity. Mathematical models adjusted to experimental results were obtained, which were used to estimate the optimal chemicals dosages and final values of response variables. For treating a raw surface water with 150 NTU and 137 U Pt-Co, an aluminum sulfate coagulant (27,9 mg/L) combined with of tara gum flocculant (3 mg/L) allowed to obtain the minimum values of 1,7 NTU and 3,2 U Pt-Co, respectively. Based on reagents doses, a cost of 0,22 USD/m<sup>3</sup> was estimated for this combination. Drought season were removal so that algae as chlorophyll-a (a green pigment found in algae); it wasn't in the water.

**Key words:** aluminum sulphate, jar tests, turbidity, coagulation, flocculation.



# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 GENERALIDADES

Las partículas pueden proporcionarle al agua características antiestéticas, tales como turbiedad y color. Algunas de estas partículas pueden incluso adsorber en su superficie agentes infecciosos como bacterias, virus, protozoarios y compuestos tóxicos, que afectan la salud humana, por lo que se hace necesaria la remoción de éstas (MWH 2005).

Además de turbiedad y color, el crecimiento de la población de algas en aguas superficiales puede ocasionar problemas técnicos en las instalaciones de las plantas potabilizadoras, además de problemas de tipo sanitario, que afectan la salud de los seres humanos. Entre los problemas técnicos se encuentran: la obstrucción de rejillas, el incremento en la demanda de coagulante y problemas de filtración. Por otra parte, los problemas sanitarios son: precursores de subproductos tóxicos de desinfección, liberación de olores y sabores indeseables en el agua, crecimiento microbiano en sistemas de distribución y liberación de toxinas por algunas especies de algas (Knappe *et al.* 2004).

El agua es una necesidad básica del hombre, siendo importante conocer e investigar los insumos químicos, que permitan su potabilización y reduzcan los impactos en el ambiente. El proceso de potabilizar el agua “cruda” puede verse como una serie de subprocesos acoplados entre sí. Una posible agrupación y algunos de los principales campos actuales de investigación son: la captación de agua cruda, coagulación – floculación, adsorción, sedimentación, filtración y desinfección.

El agua es un recurso imprescindible para los seres vivos, de su potabilización depende la vida y la salud de las personas; por ello, se les somete a tratamientos que se basan en procesos físicos-químicos utilizando coagulantes y floculantes sintéticos y/o naturales, para promover la remoción de turbidez, partículas no sedimentables, volumen de lodos, conductividad eléctrica y color. En este sentido, la ejecución de nuevas investigaciones se justifica como en el presente, habiéndose determinado la eficiencia de coagulantes y floculantes naturales como el polvo de tara y goma de tuna.



Para el consumo de agua potable para la ciudad de Huamanga, cuyo principal recurso es el agua proveniente del embalse Cuchoquesera, es de gran importancia evaluar el sistema de tratamiento de agua potable para establecer la calidad de agua consumida. Por las consideraciones antes expuesta, la presente investigación se justifica por las siguientes razones:

- **Conveniencia.** La investigación permite conocer las diferentes dosificaciones de coagulantes y floculantes para la remoción de sedimentos en el agua, del embalse Cuchoquesera.

- **Relevancia social.** Las poblaciones aledañas y aguas abajo de la presa Cuchoquesera específicamente la ciudad de Huamanga conozca la calidad física química de las aguas que consumen y así evitar enfermedades que afectan a la salud.

- **Implicaciones prácticas.** La generación de pautas y bases para la creación de archivos o mapas de distribución espacial de los parámetros físico químicos de las aguas del embalse Cuchoquesera, las consideraciones de salubridad de la población rural de las localidades de Putacca, Cuchoquesera, Pampamarca, Sunilla, Lihuapata e Ichupata; de esta forma bajar las pérdidas humanas por consumo de agua no potable. La utilización de polímeros naturales como alternativa por ser inocuos a las personas; así como la necesidad de vigilancia de las aguas superficiales.

- **Valor teórico.** Se aplican técnicas estandarizadas volumétricas, gravimétricas e instrumentales. Las pruebas de jarras realizadas siguieron un diseño experimental factorial, evaluando los factores de turbidez, dosis de coagulante y dosis de floculante, habiéndose desarrollado modelos matemáticos ajustados a los resultados, con los que se determinaron las dosis óptimas de reactivos y los valores finales de las variables de respuesta.

- **Utilidad metodológica.** El uso de nuevas herramientas de cálculo para conocer la dosificación de coagulante-floculante usando métodos computacionales, habiéndose utilizado el programa R que optimiza la dosificación de las aguas del embalse Cuchoquesera; la utilización de datos a partir de los archivos SIG y AUTOCAD; la aplicación del diseño de experimentos (DDE) para conocer el proceso coagulación - floculación, mediante la planeación y realización de un conjunto de pruebas experimentales; lo que ha permitido entender mejor el comportamiento del proceso.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

- Evaluar las diferentes dosificaciones de coagulantes y floculantes para la remoción de sedimentos del agua del embalse Cuchoquesera – Ayacucho.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar la variabilidad de los parámetros físicos y químicos del agua superficial cruda del embalse Cuchoquesera.
- Determinar la mejor combinación y dosis óptimas de coagulante-floculante para la remoción de sedimentos y turbidez del agua cruda del embalse Cuchoquesera.
- Analizar el costo de tratamiento de las combinaciones de coagulantes y floculantes aplicando los resultados óptimos.

## **II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 AGUA POTABLE**

Es considerada agua potable, toda agua natural o producida por un tratamiento de potabilización que cumpla con las normas de calidad establecidas para tal fin. Las normas se basan en estudios toxicológicos y epidemiológicos, así como las consideraciones estéticas. El agua potable se produce a partir del agua contaminada que proviene de aguas superficiales (lagos, arroyos, lagunas, ríos, mares, océanos y glaciares), subterráneas (pozos profundos) y atmosféricas (lluvias).

Debido a la amplia gama de contaminantes, los diferentes niveles de contaminación, y la cinética química de las sustancias, elementos, materia orgánica y microorganismos que se incorporan en el cuerpo del agua, es indispensable conocer sus características físicas, químicas y microbiológicas antes de seleccionarla como fuente de agua.

Siendo el agua indispensable para la vida, es necesario que los consumidores dispongan de un abastecimiento de agua satisfactorio, por lo que el abastecedor debe realizar el mayor esfuerzo posible para suministrar agua de calidad de acuerdo con las normas establecidas. Cada país es el encargado de establecer las normas y vigilar su cumplimiento.

### **2.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y ELÉCTRICAS DE LAS PARTÍCULAS EN EL AGUA**

En las aguas superficiales, existen partículas que pueden provenir de la degradación del suelo o de fuentes atmosféricas y otras son producto de procesos químicos y biológicos llevados a cabo dentro del cuerpo de agua. Las partículas incluyen a las arcillas, limos, asbestos, precipitados de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ , algas, organismos patógenos y hasta restos de organismos acuáticos (Duan y Gregory 2003).

Las partículas pueden proporcionar al agua características antiestéticas, como turbidez y color. Algunas de estas partículas pueden incluso adsorber en su superficie agentes infecciosos como bacterias, virus, protozoarios, y compuestos tóxicos, que afectan la salud humana, por lo que se hace necesaria la remoción de éstas (MWH 2005).

Hendricks (2006) y Benefield (1982) señalaron que la gran mayoría de las partículas en el agua están cargadas eléctricamente en su superficie y en gran parte de los casos, esta carga es negativa; dicha carga eléctrica puede ser adquirida de las siguientes formas:

**- Imperfecciones cristalinas**

Se presenta cuando algunos iones de materiales cristalinos son sustituidos por otros iones de menor valencia (por ejemplo, silicio +4 remplazado por aluminio +3), resultando en una red cristalina con excedente de carga negativa.

**- Adsorción preferencial de iones específicos**

Ocurre cuando algún ion de carga positiva o negativa se encuentra disperso en el agua y se adsorbe en la superficie de las partículas.

**- Reacciones químicas específicas de ciertos iones en la superficie de las partículas**

Sucede cuando los grupos ionizables en la superficie de las partículas se disocian en agua produciendo carga eléctrica (AWWA 1990; Benefield 1982).

Esta carga eléctrica en la superficie de las partículas ocasiona que se presente una repulsión eléctrica entre ellas, provocando a su vez que éstas no puedan hacer contacto y así permanezcan suspendidas.

## **2.3 MATERIA ORGÁNICA**

La materia orgánica que puede presentarse en el agua potable tiene como origen los sedimentos coloidales y proviene de diversas fuentes (Tomaszewska *et al.* 2004):

- Materia orgánica natural.
- Compuestos derivados de actividades humanas.
- Compuestos que se forman en etapas de desinfección.

### **2.3.1 Materia orgánica natural**

Materia orgánica natural (MON) es el término usado para describir la compleja matriz de compuestos químicos orgánicos que tienen origen natural y que están presentes en todos los cuerpos de agua (Parsons y Jefferson 2006).

La MON se encuentra en variadas concentraciones y es una compleja mezcla de compuestos formados como resultado de interacciones entre el ciclo hidrológico y la biosfera, principalmente la degradación en el ambiente de material vegetal y animal (Matilainen *et al.* 2010). También, incluye secreciones de actividad metabólica de algas, protozoarios, microorganismos y formas de vida superiores; por ejemplo, meta bolitos como metilisoborneol (MIB) y geosmina, que imparten el sabor y olor terro-mohoso al agua que está densamente habitada por cianobacterias y actinomicetos.

La materia orgánica natural no es volátil, es altamente soluble, contempla todos los compuestos orgánicos naturales disueltos; la mayoría de las moléculas que la componen están cargadas negativamente (pH natural del agua), carga generalmente atribuida a grupos carboxílico y fenol (Sharp *et al.* 2006). Una gran variedad de compuestos, desde estructuras pequeñas como carbohidratos y aminoácidos, hasta complejas estructuras como los ácidos húmicos y fúlvicos (anillos aromáticos asociados a distintos radicales), constituyen la MON (Matilainen *et al.* 2010). La composición elemental de la MON es de 45-60 de carbono, 4-5 de hidrógeno, 35-40 de oxígeno y 1-2 por ciento de nitrógeno (Egeberg *et al.* 1999).

Una aproximación típica para caracterizar la MON es dividir la mezcla en fracciones hidrofílica e hidrofóbica. La fracción hidrofílica contempla ácidos carboxílicos, carbohidratos y proteínas; mientras que la fracción hidrofóbica incluye las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos); a su vez, la MON varía de moléculas con bajo peso molecular (BPM), como los aminoácidos, carbohidratos; a moléculas con alto peso molecular (APM), como las sustancias húmicas (Matilainen *et al.* 2010).

La complejidad de la MON hace impráctico medir compuestos individuales; por lo tanto, se emplean parámetros indirectos para su medición. Los parámetros más comunes para cuantificar la materia orgánica son el carbono orgánico total (COT), carbono orgánico disuelto (COD), color, absorbancia UV a 254 nm (UV254) y absorbancia UV específica (SUVA) (Matilainen *et al.* 2010). En general, mediante la medición del COD es posible determinar la concentración de los compuestos orgánicos presentes en el agua, empleándose frecuentemente como indicador del contenido de materia orgánica.

La absorbancia UV es característica de sustancias con doble enlace carbono-carbono y carbono-oxígeno, por conveniencia, una sola longitud de onda es preferida para las determinaciones de absorbancia UV, siendo ésta la de 254 nm, la cual corresponde a la de

máxima absorbancia del benceno; dado que la MON contempla ácidos húmicos y fúlvicos, es posible realizar la medición indirecta mediante este parámetro (Matilainen *et al.* 2010). También, se considera la absorbancia UV a 272 nm (UV272), asociada a la formación de compuestos halogenados en las etapas de pre y post- cloración, siendo la remoción de este parámetro muy importante en los procesos de potabilización para reducir el potencial de formación de subproductos de la desinfección (SPD).

La absorbancia ultravioleta específica (SUVA) se determina como la relación entre UV254/COD y corresponde con el tipo de fracción dominante (hidrofóbica e/o hidrofílica) de la MON presente en el agua. El color del agua es un indicador del contenido de materia orgánica, incluyendo ácidos húmicos y fúlvicos, la presencia natural de iones metálicos como hierro y manganeso, presencia de metabolitos de organismos y turbiedad; ya que la presencia de ésta, incrementa el color aparente del agua, mientras que el color verdadero es causado por especies disueltas (Parsons y Jefferson 2006). La turbiedad representa la materia en suspensión, la cual contempla el contenido orgánico e inorgánico y es importante su remoción, puesto que pueden reducir la claridad del agua, incrementar el color y contener agentes infecciosos (bacterias, virus, protozoarios, etc.) y tóxicos (plaguicidas, metales pesados, etc.).

La remoción de MON ha sido relevante en el tratamiento del agua, puesto que puede representar diversos problemas; como el de proporcionar color, sabor y olor al agua; como el contenido de metales o de moléculas micro contaminantes, así como, aumentar la demanda de coagulante (y con ella los costos); conllevar a la formación de compuestos halogenados por desinfección (SPD); e implica el crecimiento microbiano en los sistemas de distribución (Matilainen *et al.* 2010). Por todo lo anterior, es deseable reducir la concentración de MON en el agua potable. La MON puede ser removida del agua mediante procesos de tratamiento tradicionales como coagulación/floculación, o por técnicas avanzadas, como adsorción en carbón activado (Matilainen *et al.* 2010).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA) ha reconocido, tanto a la coagulación mejorada como a la adsorción en carbón activado, como dos de las mejores tecnologías disponibles para controlar a los precursores de SPD (MON); la materia orgánica natural hidrofóbica tiende a ser removida más fácil que la MON hidrofílica (Matilainen *et al.* 2010).

En la Tabla 1 se muestra el resumen de los procesos existentes para la remoción de materia orgánica natural (MON) y sus principales inconvenientes.

**Tabla 1: Resumen de procesos para la remoción de materia orgánica natural**

| Procesos                | Remociones típicas de MON (%) | Inconvenientes   |
|-------------------------|-------------------------------|--|
| Coagulación-floculación | 10-60                         | Producción de lodos. Costo de reactivos  |
| Adsorción               | 60-90                         | Agotamiento del carbón, y necesidad de regeneración o sustitución  |
| Intercambio iónico      | 30-80                         | Agotamiento de la resina, y necesidad de regeneración o sustitución. Mayor costo que el proceso de adsorción         |
| Membranas               | 80-90                         | Requiere de pre tratamiento para prevenir taponamiento de membrana. Alto costo de las membranas                      |
| Ozonación               | 27-75                         | Eficiencias variables de remoción, requerimientos de equipos para generar ozono. Formación de compuestos halogenados |

FUENTE: MWH (2005); Tan *et al.* (2008)

## 2.4 COMPUESTOS ORGÁNICOS SINTÉTICOS

Los compuestos químicos orgánicos provenientes de la industria, la agricultura y efluentes municipales son encontrados rutinariamente en fuentes de agua para abastecimiento humano.

MWH (2005) indicó que las aguas superficiales son especialmente vulnerables a la captación de los contaminantes. La gran mayoría de los compuestos son sintéticos, por lo que comprenden una amplia variedad de químicos, tales como compuestos volátiles (benceno, tolueno, xilenos, etc.), herbicidas (atrazina, 2,4-D, metoalclor, etc.), plaguicidas (aldrín, lindano, dieldrín, etc.) y compuestos emergentes (fármacos, hormonas, etc.).

A este tipo de sustancias se les denomina como micro contaminantes por la baja concentración presentes en cuerpos superficiales de agua, 1-500 µg/L generalmente, representa valores típicos de COD de 1 a 3 mg/L (MWH 2005). Mediante el tratamiento convencional (coagulación-floculación, sedimentación, filtración) se ha demostrado que no es posible la remoción de varios de éstos micro contaminantes y es complementando el

tratamiento con una etapa de adsorción es posible removerlos a concentraciones deseables (Rossner *et al.* 2009). En la Tabla 2 se muestran los polímeros naturales con propiedades coagulantes o floculantes.

**Tabla 2: Polímeros naturales que tienen propiedades coagulantes o floculantes**

| <b>Nombre Común</b>                              | <b>Planta</b>           | <b>Parte de donde se obtiene</b> |
|--|-------------------------|----------------------------------|
| Alginato de sodio                                | Algas pardas marinas    | Toda la planta                   |
| Goma de tuna                                     | Tuna o nopal            | Hojas o pencas                   |
| Almidones solubles en agua fría (pregelatizados) | Maíz, papa, yuca, trigo | Grano o tubérculo                |
| Semillas de nirmali                              | Nirmali                 | Semillas                         |
| Pulpa de algarrobo                               | Algarrobo               | Corteza de árbol                 |
| Gelatina común                                   | Animales                | Huesos de animales               |
| Carboximetil celulosa                            | Arboles                 | Corteza de árbol                 |
| Goma de guar                                     | Arbusto de guar         | Semilla                          |
| Floecotan  | Quebracho               | Corteza de árbol                 |
| Tamarindo  | Árbol de fruto tropical | Semillas                         |
| Fenogracó, albolva                               | Trigonella              | Semillas                         |

FUENTE: Aguilar (2010)

## 2.5 COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

### 2.5.1 Teoría de la coagulación y floculación

La coagulación – floculación es un tratamiento esencial para remover aquellas partículas que, debido a su pequeño tamaño (usualmente menor a 10  $\mu\text{m}$ ), no precipitarían en un tiempo razonable (de 30 a 60 minutos), desde el punto de vista operativo de una planta de tratamiento de agua (Bratby 2006).

La coagulación-floculación es un proceso complejo que involucra gran cantidad de reacciones y reactivos posibles. Actualmente, se han propuesto definiciones y terminología para aclarar algunas confusiones con los conceptos; sin embargo, no existe aún una convención generalizada para los términos de coagulación y floculación, pudiendo en ocasiones ser utilizados indistintamente.



La coagulación se define como un proceso unitario utilizado para causar la coalescencia o agregación de material suspendido no sedimentable y partículas coloidales del agua y de aguas residuales; es un proceso por el cual se reducen las fuerzas repelentes existentes entre partículas coloidales para formar partículas mayores de buena sedimentación. El proceso consiste en la adición de sustancias químicas al agua, su distribución uniforme en ella y la formación de un floc fácilmente sedimentable (Wilderer *et al.* 2003).

Bratby (2006) y AWWA (1990) indicaron que la floculación es el proceso de contacto de los microflóculos para formar conglomerados de mayor peso, tamaño y resistencia llamados flóculos, que precipitan más rápidamente. Estas definiciones para coagulación y floculación generalmente son derivadas de la práctica en la ingeniería de tratamiento de aguas, sin embargo, pueden existir otras definiciones.

Típicamente, las etapas que conforman el proceso de coagulación – floculación se llevan a cabo en dos tipos de tanques instalados en serie: el primero es el tanque de mezcla rápida, donde se hidroliza el coagulante y ocurre la desestabilización de la carga de las partículas y, el segundo, es el tanque con el mezclado lento, donde se promueve el contacto entre las partículas ya desestabilizadas y agrupadas en microflóculos (AWWA 1990).

### **2.5.2 Mecanismos de coagulación y floculación**

Duan y Gregory (2003) mencionaron que el éxito en la remoción de partículas en el agua depende de la desestabilización de la carga eléctrica en su superficie; siendo los mecanismos más comunes para llevar a cabo esta función los siguientes:

- **La compresión de la doble capa eléctrica.** Ocurre cuando la concentración de los contraiones en el agua es tal, que estos comprimen la capa eléctrica en la superficie de las partículas, debido a las fuerzas de atracción entre estos dos tipos de iones.
- **La desestabilización por atracción electrostática.** Ocurre cuando se encuentran dos partículas con superficies cargadas opuestamente, neutralizándose ambas cargas al hacer contacto.
- **El enlace entre las partículas.** Se puede llevar a cabo utilizando polímeros, que están formados por cadenas largas de moléculas cargadas eléctricamente. Estos polímeros pueden formar puentes o enlaces para desequilibrar las partículas en suspensión.

- **La coagulación por arrastre o barrido.** Se presenta cuando ciertos compuestos metálicos se hidrolizan para formar un precipitado amorfo e insoluble (correspondiente al hidróxido del metal). Este precipitado atrapa en su estructura amorfa a las partículas suspendidas en el agua a la vez que sedimenta, en una acción de barrido. Este mecanismo ha demostrado ser más eficiente para la remoción de partículas en el agua para desequilibrar por neutralización de carga, aunque se requieren dosis más altas de coagulante para la formación del precipitado amorfo.

### 2.5.3 Factores que influyen en el proceso de coagulación-floculación

Spellman (2008) y Montgomery (1985) reportaron que existen diversos factores que influyen en el proceso de coagulación-floculación del agua, de ahí que el proceso es complejo. Estos factores se pueden dividir en cuatro principales categorías:

- **Características del coagulante:** el tipo y la dosis del coagulante.
- **Características del agua:** el pH, la concentración de partículas coloidales, la concentración de carbono orgánico total (COT), el color, los aniones y cationes en solución, la temperatura y la preoxidación del agua.
- **Características del mezclado:** el tiempo y gradiente de la agitación del agua, equipo de mezclado.
- **Características de las partículas:** el potencial Z, el tamaño, la movilidad pericinéctica (debida al movimiento browniano) y ortocinéctica (gradiente de velocidad) y la capacidad de flotar.

El pH del agua es un factor determinante en la eficiencia de la coagulación y floculación de las partículas, especialmente cuando se utilizan sales metálicas como el sulfato de aluminio, debido a que la hidrólisis de dichas sales dependerá del valor del pH del agua. Para el agua en particular, existirán especies de la hidrólisis de la sal metálica que sean más efectivas para llevar a cabo la desestabilización de las partículas. Por ello, ajustar el pH a un intervalo donde se consigan las especies de la hidrólisis deseada llevará a obtener una coagulación óptima (Bratby 2006). Además, las partículas en el agua también pueden sufrir modificaciones causadas por el pH, principalmente en la carga superficial, aumentando o disminuyendo el valor de esta debido a la ionización de algunos grupos funcionales, como ocurre con la

materia orgánica natural (Hendricks 2006). También, hay compuestos modificadores de pH, tal como se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3: Modificadores de pH**

| Compuesto           | F. Química                      |
|---------------------|---------------------------------|
| Oxido de calcio     | CaO                             |
| Hidróxido de calcio | Ca(OH) <sub>2</sub>             |
| Carbonato de sodio  | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> |
| Gas carbónico       | CO <sub>2</sub>                 |
| Ácido sulfúrico     | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  |
| Ácido clorhídrico   | HCl                             |

FUENTE: Pérez (1973)

La presencia de aniones en el agua, tales como sulfatos, silicatos o fosfatos, puede provocar el restablecimiento de la carga superficial de las partículas, inicialmente negativas, y que nuevamente se dispersen en el agua. Además, los aniones pueden aumentar la demanda de coagulante, pues, al igual que la superficie de las partículas, atraerán a las especies catiónicas del coagulante. Por otro lado, los cationes en el agua como Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, pueden tener un efecto positivo en la coagulación de las partículas en el agua y la materia orgánica natural, debido a que se pueden presentar los fenómenos de compresión de la doble capa eléctrica en la superficie de las partículas, la reducción de la carga negativa de la superficie de las partículas y la minimización de las fuerzas de repulsión eléctrica entre ellas, asistiendo así a la coagulación (Wang *et al.* 2005).

La materia orgánica natural (MON) cuantificada en laboratorio como carbono orgánico total (COT) es responsable, en gran medida, del color, olor y sabor del agua superficial. Se compone de una gran variedad de compuestos orgánicos, siendo de los principales los ácidos fúlvicos y húmicos. La MON puede adsorberse en las partículas que se encuentran en el agua y cubrir su superficie, incrementando así la carga superficial negativa de éstas (debida a los grupos carboxilatos y fenolatos que se encuentran en la MON), ocasionando así que se requieran de dosis de coagulante más elevadas para la neutralización de la carga. De hecho, en el caso del sulfato de aluminio, la dosis de coagulante tiene una relación estequiométrica con la concentración de ácidos fúlvicos, además de que en presencia de la MON la carga superficial positiva de los flóculos de Al (OH)<sub>3</sub> disminuye, en comparación con lo que sucede en agua sin carga orgánica (Hendricks 2006).

La temperatura del agua puede afectar el movimiento de las partículas y por consiguiente la tasa de colisiones entre ellas. Las partículas, cuyo tamaño es mayor a un  $\mu\text{m}$ , tienen una tasa de colisiones ortocinéticas que excede en gran medida a la tasa de colisiones pericinéticas, debidas al movimiento Browniano. En la coagulación ortocinética las partículas colisionan debido a los movimientos del fluido en el cual se encuentran suspendidas. Es por ello que una alta viscosidad del agua, a causa de una baja temperatura, causará que el mezclado de las especies de coagulante y las partículas sea pobre y resulte con una deficiente coagulación.

También, la temperatura puede afectar las reacciones de hidrólisis de las sales metálicas (sulfato de aluminio) y el equilibrio entre la fase sólida y las especies en solución de esas sales. En el caso del sulfato de aluminio, la disminución de la temperatura en el agua ocasiona que el hidróxido de aluminio y las especies positivas provenientes de la hidrólisis formen valores de pH mayores a los que se formaría a  $25^{\circ}\text{C}$  (Duan y Gregory 2003).

La preoxidación del agua es uno de los principales métodos utilizados para mejorar el desempeño del proceso de coagulación-floculación. Entre las principales funciones están oxidar la MON suspendida en el agua o adherida a la superficie de las partículas; inactivar y desestabilizar las algas que se encuentran suspendidas en el agua y auxiliar en la remoción de turbiedad y color en el agua (Ma *et al.* 2001). La preoxidación con cloro, o precloración, es quizá el proceso más antiguo conocido para ayudar al proceso de coagulación y floculación. Sin embargo, la precloración puede formar una variedad de compuestos dañinos a la salud, como los trihalometanos (THM), por lo que su uso está siendo cada vez más restringido en el tratamiento de agua, y se han propuesto otros métodos alternativos como la preoxidación con dióxido de cloro, ozono o permanganato de potasio, que minimicen los subproductos de la desinfección (Henderson *et al.* 2008; Ma *et al.* 2001).

En el caso del mezclado del agua, los reactores de mezcla rápida deben proveer el tiempo y la intensidad de mezclado necesario para favorecer el contacto entre las partículas y el coagulante, para formar así los microfloculos. Esto se debe a que la reacción de adsorción del coagulante y la desestabilización de carga de las partículas dura poco menos de 0,5 s, aproximadamente; sin embargo, si el mecanismo de coagulación es por barrido, se requiere de un tiempo de entre uno y siete segundos para que el precipitado, por ejemplo, de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , pueda formarse (Hendricks 2006).

El potencial Z (designado usualmente por el símbolo Z) es la medida de la carga eléctrica que poseen las partículas en su superficie. Este número puede ser utilizado para conocer el momento en el que se ha alcanzado el punto isoeléctrico en la suspensión (potencial Z igual a cero); es decir, cuando la carga superficial en las partículas ha sido neutralizada. El punto isoeléctrico se puede determinar, por ejemplo, graficando el potencial Z contra la dosis de coagulante, para ubicar la dosis a la cual el potencial Z sea cero o se encuentre en un intervalo de  $-5 < Z < +5$  mv, lo que será señal de que se ha alcanzado una efectiva neutralización de carga (Hendricks 2006).

#### **2.5.4 Reactivos utilizados para coagulación – floculación**

Las principales funciones de los reactivos coagulantes y floculantes son desestabilizar las partículas en suspensión y aglomerar éstas en flóculos de mayor tamaño, peso y resistencia, respectivamente. Los reactivos deben tener un bajo costo, ser de fácil manejo, ser fácilmente disponibles y estables durante el periodo que se almacenen (De Wolfe *et al.* 2003; Montgomery 1985).

Los factores que influyen en la elección de la dosis y el tipo de coagulante son las características del coagulante, la calidad del agua y las partículas en suspensión. Debido a esto y que aún no es posible predecir con exactitud la interrelación de estos tres factores, se debe realizar la evaluación empíricamente (Bratby 2006).

Entre los reactivos más comúnmente utilizados para el proceso de coagulación y floculación se encuentran las sales de aluminio, las sales de hierro, los polímeros orgánicos y los polímeros inorgánicos (como los policloruros de aluminio o de hierro).

##### **a. Sulfato de aluminio**

El sulfato de aluminio es el coagulante que se usa con más frecuencia en el tratamiento de agua (Bratby 2006; Hendricks 2006). Sin embargo, su utilización presenta una serie de desventajas. Por ejemplo, para que su uso sea eficiente se requiere operar el proceso en un intervalo muy limitado de pH, debido a que la reacción de hidrólisis del sulfato de aluminio es dependiente del valor de este parámetro, y solo en un intervalo muy limitado (seis a ocho) o se obtienen las especies de interés como:  $\text{Al(OH)}^{2+}$  o el precipitado  $\text{Al(OH)}_3$ . Aunado a ello, una vez que se ha agregado el coagulante, el valor del pH disminuye significativamente en el agua tratada, haciéndola corrosiva.

Por otra parte, la reacción de hidrólisis del sulfato de aluminio en el agua forma compuestos positivos de aluminio y con una baja densidad de carga, además de que esta reacción también es afectada por la temperatura. Se ha reportado, que el sulfato de aluminio, bajo ciertas condiciones, puede liberar un alto contenido residual de aluminio en el agua tratada y, debido a que se emplean altas dosis de este coagulante, se produce una gran cantidad de lodos (Zouboulis *et al.* 2008).

El sulfato de aluminio presenta reacciones de hidrólisis en las que el ión aluminio consume la alcalinidad del agua a tratar, transformándose finalmente en un precipitado de hidróxido de aluminio (Bratby 2006; Duan y Gregory 2003).

El pH es un factor importante en el desempeño del sulfato de aluminio como coagulante. A un valor de pH menor a cuatro (algunos autores sugieren que incluso hasta  $\text{pH} \leq 7$ ) se forman las especies catiónicas de aluminio como  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ , las cuales desestabilizan a las partículas en el agua por neutralización de carga (Hendricks 2006; Montgomery 1985). Mientras que, por encima de  $\text{pH} = 6$  y hasta  $\text{pH} = 8$  se forma un precipitado amorfo de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , que arrastra las partículas a su alrededor. Esta coagulación por barrido requiere dosis de coagulante mayores a aquellas necesarias para la neutralización de carga, lo que lleva a la producción de grandes cantidades de lodo. Se ha encontrado que la formación óptima de flóculos, utilizando sulfato de aluminio, ocurre cuando el pH del agua se encuentra entre seis y ocho (Franceschi *et al.* 2002).

El proceso de coagulación por barrido con sulfato de aluminio puede ser auxiliado por las mismas partículas coloidales en el agua, que sirven como núcleos de formación del precipitado  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Debido a lo anterior, la tasa de precipitación aumenta cuando la concentración de partículas coloidales (turbiedad) se incrementa en el agua. Se ha reportado que en ocasiones se incrementa la turbiedad artificialmente agregando, por ejemplo, partículas de bentonita para mejorar la coagulación por barrido.

#### **b. Policloruros de aluminio (PACl)**

De Wolfe *et al.* (2003) reportaron en una encuesta realizada por la Asociación Americana de Servicios de Aguas, operaciones de 225 plantas de potabilización de agua superficial pertenecientes a esta asociación, cubriendo distintos tipos de instalaciones, caudales y prácticas de tratamiento. En la encuesta se reportó que en la mayoría de las plantas potabilizadoras (86 por ciento del total) cambió el sulfato de aluminio por algún otro

coagulante. En más de la mitad de estos casos, el cambio se realizó por PACl, en un esfuerzo por mejorar el proceso de tratamiento y reducir los costos.

Algunos problemas que se deseaban mejorar con el cambio de coagulante fueron: el bajo valor de pH después de agregar el sulfato de aluminio, lo que provocaba una alta disolución de CO<sub>2</sub> y con ello la corrosión en las instalaciones; las altas cantidades de cloruros o sulfatos en el agua debido a la alta dosis de coagulante utilizadas; el incremento en la producción de lodos y la dificultad que implicaba el manejo de estos últimos (Edwards *et al.* 2006; De Wolfe *et al.* 2003).

Cuando el sulfato de aluminio se agrega al agua, los iones metálicos se hidrolizan rápidamente, pero de manera no controlada, formando una amplia variedad de especies de la hidrólisis del metal. Esta diversidad de compuestos que podían obtenerse, motivó el desarrollo de coagulantes inorgánicos prehidrolizados que permitieran obtener sólo los productos de la hidrólisis que se deseaban, independientemente de las condiciones del proceso de coagulación (Bratby 2006). Estos productos fueron desarrollados en Japón en los primeros años de la década de 1960 hasta 1985, cuando aparecen en el mercado y fueron nombrados genéricamente como policloruros de aluminio o PACl (Hendricks 2006).

Para Bratby (2006) las principales ventajas de los PACl son:

- Liberan al agua especies iónicas altamente cargadas y con moderado peso molecular. Estas especies ya se encuentran preformadas por lo que no requieren condiciones específicas de temperatura, pH, alcalinidad, entre otras tal como ocurre con el sulfato de aluminio.
- Pueden operar eficientemente sobre un amplio intervalo de pH (de cuatro a nueve) y temperaturas (de 4 a 25°C) del agua.
- Pueden utilizarse para el tratamiento de aguas de baja alcalinidad y alta turbiedad.
- Causan una menor variación en el pH del agua tratada, si se le compara con aquella provocada por el sulfato de aluminio.
- Requieren de menores dosis para una coagulación efectiva y, por lo tanto, la producción de lodos es menor.
- Liberan una menor cantidad de iones cloruros y sulfatos residuales.

- Producen menor cantidad de iones metálicos residuales.

- Forman flóculos más compactos y densos, debido a que estos coagulantes contienen, en su estructura, especies poliméricas que atrapan a un mayor número de partículas.

Estos reactivos están compuestos de una amplia variedad de especies poliméricas; también, se pueden encontrar las especies monoméricas como el  $Al^{+3}$  y  $Al(OH)^{2+}$ . La presencia y distribución de estas especies en preparaciones de policloruros de aluminio, depende del tipo de coagulante, la concentración total de aluminio, la cantidad de base utilizada durante la preparación, la intensidad de mezclado y el grado de estabilidad de las especies (Bratby 2006).

Una manera de conocer las especies que forman a los PACl es a través del grado de neutralización o de basicidad  $r$ , que es la relación molar de cargas negativas y positivas del compuesto ( $r = OH/Al^{+3}$ ), pudiendo oscilar entre  $0 < r < 3$  (Hendricks 2006).

Cuanto mayor es el grado de basicidad del coagulante, menor es el consumo de la alcalinidad y el cambio en el pH en el agua tratada (Bratby 2006). Se ha demostrado que diversos coagulantes parcialmente hidrolizados forman flóculos más resistentes que aquellos logrados con dosis similares de sulfato de aluminio y llevan a cabo la floculación más rápidamente (Duan y Gregory 2003). Por ejemplo, se ha observado que utilizando el sulfato de aluminio el tiempo promedio de floculación es de 20 minutos, pero empleando los PACl, de diferentes niveles de basicidad, se han logrado tiempos menores a 10 minutos (Wilderer *et al.* 2003).

Bratby (2006) señaló que en la familia de los PACl existen distintos compuestos poliméricos utilizados en el tratamiento de agua, como los clorhidratos de aluminio, los policloruros de aluminio, los polihidroxiclorosilicatos de aluminio y los polihidroxiclorosulfatos de aluminio, que se describen a continuación:

- **Clorhidrato de aluminio.** Probablemente, fue el primer compuesto de los coagulantes prehidrolizados, y es un policloruro de aluminio de alta densidad. Fue desarrollado en el Reino Unido en la década de 1950. Ha demostrado tener ventajas globales sobre el sulfato de aluminio al producir menor volumen de lodos y liberar menor cantidad de aluminio residual en el agua tratada. La basicidad de este tipo de compuestos se encuentra alrededor del 83 por ciento y el contenido de aluminio oscila entre el 7 y 12 por ciento.



- **Policloruros de aluminio.** Existen numerosas formulaciones de los policloruros de aluminio, además del clorhidrato de aluminio. La mayoría de estas formulaciones se encuentran en forma líquida, aunque también están disponibles en polvo. Las basicidades relativas en los productos líquidos varían de 30 a 80 por ciento y el contenido de aluminio de 5 a 12 por ciento. La densidad específica de los productos líquidos puede variar de 1,2 a 1,4, a 20°C.

- **Polihidroxiclorosulfatos de aluminio.** Son compuestos que normalmente se encuentran con una basicidad en el intervalo de 40 a 70 por ciento y un contenido de aluminio de 4,2 a 5,3 por ciento.

- **Polihidroxiclorosilicatos de aluminio.** Son eficaces en el tratamiento de agua residual y potable. Las presentaciones comerciales, generalmente, en forma líquida, pueden proveer del 7,5 de contenido de Al, con basicidades relativas de 40 a 70 por ciento. En la Tabla 4 se presentan los coagulantes metálicos.

**Tabla 4: Coagulantes metálicos**

| <b>Compuestos de aluminio</b> |  |
|-------------------------------|--|
| Sulfato de aluminio           | $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$                    |
| Aluminato de sodio            | $NaAlO_2$                                      |
| Alumbre de potasio            | $Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24H_2O$      |
| Alumbre de amonio             | $Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$ |
| Policloruro de aluminio       | $Al_2(OH)_nCl_{6-n}$                           |
| <b>Compuestos de hierro</b>   |  |
| Cloruro férrico               | $FeCl_3$                                       |
| Sulfato férrico               | $Fe(SO_4)_3$                                   |
| Sulfato ferroso               | $Fe(SO_4)_7 \cdot 7H_2O$                       |
| <b>Otros</b>                  |  |
| Carbonato de magnesio         | $MgCO_3$                                       |

FUENTE: Pérez (1973)

### c. Polímeros orgánicos

El primer polímero sintético fue aprobado para su uso en el tratamiento de agua potable en 1967. A partir de aquel entonces más de mil productos poliméricos han sido autorizados por la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (USEPA). Estos compuestos son moléculas de cadenas largas formadas de unidades químicas (monómeros) se repiten una y otra vez en toda la extensión del polímero. Estas unidades, generalmente, son iónicas e imparten al polímero una carga eléctrica, por lo que comúnmente los polímeros orgánicos son llamados

*polielectrolitos*. Estos productos tienen aplicaciones en el tratamiento de agua como coagulantes primarios, floculantes y acondicionadores de lodos (como deshidratadores). Cuando son usados como coagulantes primarios, no producen una gran cantidad de lodo, como sucede por ejemplo con el sulfato de aluminio (Hendricks 2006).

Los polímeros se pueden clasificar de acuerdo al tipo de carga, el peso molecular, la densidad de carga, la estructura y la composición o sustancia activa; sin embargo, con fines prácticos, se dividen en tres clases: catiónicos, aniónicos y no iónicos.

Los polímeros catiónicos tienen sitios cargados positivamente en su estructura y se encuentran comercialmente disponibles en una gran variedad de densidades de carga y peso molecular. Cabe señalar, que debido a que la mayoría de las partículas en aguas naturales poseen carga negativa en su superficie, los polímeros catiónicos son los más utilizados para la desestabilización de las partículas por neutralización de carga (Hendricks 2006; Montgomery 1985).

Los polímeros aniónicos son aquellos que presentan sitios cargados negativamente y son fabricados con diferentes densidades de carga. Se utilizan principalmente para enlazar las partículas (ya desestabilizadas) y así aglomerarlas; las poliacrilamidas de alto peso molecular son frecuentemente utilizadas para este propósito (Hendricks 2006; Pizzi 2005).

Los polímeros no iónicos tienen carga nula, es decir, que poseen un balance entre sus sitios cargados negativamente y aquellos con carga positiva. Su función principal es crear puentes entre las partículas, ayudándolas a aglomerarse. Generalmente, este tipo de polímeros requieren de una dosis más alta para ser efectivos, en comparación con los polímeros catiónicos y aniónicos (Hendricks 2006; Pizzi 2005).

**Ayudantes de la coagulación.** Se utilizan durante el proceso de coagulación, para mejorar la efectividad del coagulante primario, son de gran utilidad ya que, estos reducen el volumen de los sólidos depositados, amplían el rango de condiciones óptimas de floculación y minimizan los residuos químicos. En su mayoría son polímeros sintéticos o naturales (Pérez 1973).

Como una medida de la longitud del polímero puede utilizarse el peso molecular y este puede variar, tal como lo muestra la Tabla 5.

Los polímeros catiónicos de bajo a medio peso molecular, se pueden utilizar como sustitutos de las sales de aluminio o hierro; es decir, como coagulantes primarios, funcionando como neutralizadores de carga. Las dosis típicas se encuentran en el intervalo de 0,5 a 10 mg/L. Al igual que en el caso de las sales de aluminio y hierro, una sobredosis de estos polímeros puede causar la reestabilización de las partículas.

Estos polímeros se aplican en la etapa de mezclado rápido y se comercializan como soluciones acuosas (Hendricks 2006; Pizzi 2005). En cambio, los polímeros de alto a muy alto peso molecular permiten la formación de enlaces entre los microfloculos, floculos y partículas macroscópicas, y son suministrados después del mezclado rápido. Estos polímeros pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos, y funcionan incrementando el tamaño de los floculos y su resistencia. A menudo son llamados ayudantes de la coagulación. Las dosis pueden variar entre 0,1 y 1,0 mg/L. Debido a su alta viscosidad son comercializados como polvos o emulsiones (Hendricks 2006).

**Tabla 5: Clasificación de los polímeros orgánicos por su peso molecular, dosis y usos más frecuentes**

| Clasificación | Peso molecular (g/mol)  | Densidad de carga (%mol) | Dosis (mg/L) | Usos                          |
|---------------|-------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------------|
| Bajo          | 104 - 105               | ~10                      | 0,5 - 10     | Coagulante/floculante         |
| Medio         | 105 - 106               | ~25                      | 0,5 - 10     | Coagulante/floculante         |
| Alto          | 106 - 5x10 <sup>6</sup> | 50-100                   | 0,1 - 1,0    | Floculante/espesante de lodos |
| Muy alto      | > 5x10 <sup>6</sup>     | >100                     | 0,1 - 1,0    | Floculante/espesante de lodos |

FUENTE: Bache (2007)

## 2.6 SEDIMENTACIÓN

### 2.6.1 Partículas sedimentables

Aguilar (2010) indicó que las partículas en suspensión presentes en el agua son removidas por efecto gravitacional. Estas partículas deben tener un peso específico mayor que el líquido. La remoción de partículas en suspensión en el agua puede alcanzar por sedimentación o filtración; por consiguiente, ambos procesos son complementarios. Los procedimientos usados en la determinación del contenido de sólidos son métodos

gravimétricos y como tales requieren la determinación del peso de crisoles con residuos o sin ellos.

La sedimentación remueve las partículas más densas y la filtración remueve aquellas partículas con una densidad cercana a la del agua o que se encuentran suspendidas y, por lo tanto, no pudieron ser removidas en el proceso anterior.

La sedimentación es un proceso físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. 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 un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo, se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferentes formas, dependiendo de las características de las partículas, así como su concentración. De allí, que se puede referir a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculantes y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

### **2.6.2 Partículas no sedimentables**

Las aguas crudas naturales contienen tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y disueltos. Los sólidos suspendidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más pequeños (menos de 0,01 mm) no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables, y los más grandes (mayores de 0,01 mm) son generalmente sedimentables (Romero 2000).

Los sólidos coloidales consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, virus, etc., los cuales no se sedimentan sino después de períodos razonables, y su efecto global se traduce en el color y la turbiedad de aguas sedimentadas sin coagulación. Los sólidos disueltos, materia orgánica e inorgánica, son invisibles por separado, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos (Romero 2000).

También la AWWA (2000) definió:

**- Sólidos totales (ST)**

Es el resultado de haber llevado la muestra a temperatura de 105°C, durante 24 horas, obteniéndose la precipitación de todas las partículas en el fondo del recipiente.

**- Sólidos fijos (SF)**

Son los sólidos que permanecen cuando se calienta el residuo previamente evaporado y sometido a ignición a una temperatura de 550°C durante una hora.

Estos sólidos se obtienen llevando la muestra de agua a temperaturas de 550°C, con lo que todo tipo de partículas orgánicas se degradan, quedando propiamente los sólidos fijos.

**- Sólidos volátiles (SV)**

Son aquellos que se volatilizan a temperatura de 550°C. Si los sólidos totales se someten a combustión a temperatura de 550°C durante un lapso de tiempo, la materia orgánica se transforma a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Esta pérdida de peso se interpreta en términos de materia orgánica volátil.

$$SV = ST - SF \dots\dots\dots \text{(Ecuación 1)}$$

**- Sólidos suspendidos (SS)**

Es el resultado del filtrado de la muestra y alcanza a la temperatura de 105°C. Este proceso se lleva a cabo mediante procedimientos correlativos en laboratorio.

**- Sólidos suspendidos fijos (SSF)**

Es el resultado de calcinar la muestra a temperatura de 550°C, lo cual alcanzan solo los sólidos precipitados que soportaron la temperatura elevada.

**- Sólidos suspendidos volátiles (SSV)**

Son todas aquellas partículas volátiles de la muestra al presentarse temperaturas de calcinación y se obtiene mediante:

$$SSV = SS - SF \dots\dots\dots \text{(Ecuación 2)}$$

## **2.7 PRUEBA DE JARRAS PARA EVALUAR LA COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN**

A pesar de que cada vez se conoce aún más de la teoría y las reacciones químicas que ocurren en la coagulación y la floculación, siempre se emplea una prueba práctica para la selección final de las condiciones del proceso. Las pruebas prácticas se dividen en dos tipos: la prueba de jarras y la prueba en planta piloto.

La prueba de jarras es útil cuando se requiere evaluar un gran número de condiciones y variables a pequeña escala y sin emplear altas cantidades de reactivos (Hendricks 2006). Esta prueba es reconocida universalmente como la práctica más valiosa y común para simular en laboratorio el proceso de coagulación y floculación de la planta, siendo una prueba rápida, de bajo costo y se pueden obtener resultados reales, por lo que, se utiliza en muchas aplicaciones (Spellman 2008; De Wolfe *et al.* 2003). Se ha utilizado para mejorar el desempeño o la expansión de las plantas de tratamiento ya construidas y en el diseño de nuevas plantas (AWWA 2000).

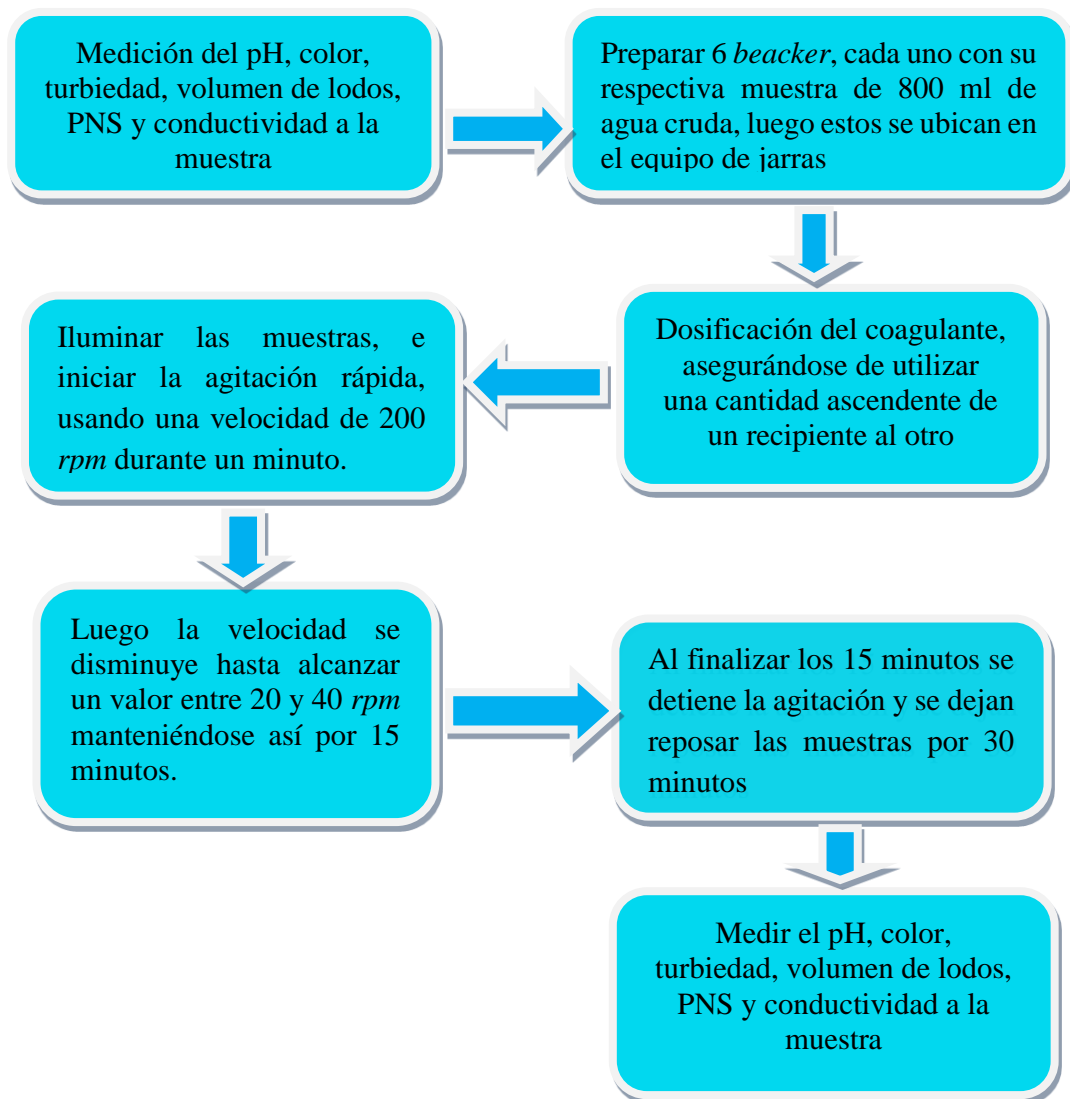
El objetivo de la prueba de jarras es simular, lo mejor posible, las condiciones deseadas en las instalaciones de coagulación - floculación. El procedimiento general para esta prueba consiste en una mezcla rápida, durante 10 segundos o menos, donde se agrega el coagulante, seguida de un periodo de mezcla lenta para simular la floculación, de 15 a 30 minutos. Los parámetros que se miden como parte de la prueba son: turbiedad, sólidos suspendidos, materia orgánica natural (MON) cuantificada como carbón orgánico total (COT), volumen del lodo producido, entre otros (ASTM 2003).

Existen diferentes metodologías propuestas para realizar la prueba de jarras; sin embargo, debido a la cantidad de variables en la coagulación - floculación y a las diferentes calidades de agua que se pueden disponer, la prueba de jarras seguirá siendo un método empírico y difícil de estandarizar (Hendricks 2006).

La prueba de jarras puede ser utilizada para la selección del coagulante, selección de la dosis y concentración inicial del coagulante; en la selección del floculante, su concentración inicial y dosis, determinación del pH óptimo, determinación del tiempo de adición de los químicos para ajustar el pH y de los floculantes, optimización de la energía de mezclado y el tiempo para la mezcla rápida y la lenta, entre otros (Pizzi 2005; AWWA 2000).

El equipo de prueba de jarras cuenta con un controlador de la velocidad de agitación del agua, lo que puede ayudar a simular las condiciones de mezclado reales a escala de planta. En las Figuras 1 y 2 se observa el esquema de los procesos y el equipo clásico para la materialización de la prueba de jarras.

La Figura 2 muestra el equipo clásico que se utiliza para la realización de la prueba de jarras. El aparato consiste, por lo general, de seis contenedores (comúnmente de un litro de capacidad y cilíndricos), y en cada una se ubica un agitador (que puede ser de paleta, de barra magnética o hélice), sin embargo, las diferencias entre la capacidad de las jarras, su forma y el tipo de mezclador no tienen un impacto apreciable en el desempeño del aparato (Bratby 2006; Hendricks 2006).



**Figura 1: Proceso de la prueba de jarras**



**Figura 2: Equipo clásico para la realización de la prueba de jarras**

## **2.8 DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

El diseño de experimentos (DDE) es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, mediante la planeación y realización de un conjunto de pruebas experimentales (Gutiérrez y De La Vara 2008). Esta aplicación se fue consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor el comportamiento del proceso (Tan *et al.* 2008).

La variable de respuesta (o simplemente respuesta) permite conocer el efecto o los resultados de cada prueba experimental; por lo tanto, pueden ser variables de respuesta las características de la calidad de un producto y/o variables que miden el desempeño de un proceso, siendo objetivo de muchos estudios experimentales el encontrar la forma de mejorar u optimizar la variable de respuesta (Gutiérrez y De La Vara 2008). Los factores de diseño (o factores) son las variables que se investigan en el experimento, en relación a cómo influyen o afectan a la variable de respuesta, por lo que debe considerarse aquéllos que puedan ser controlables durante la experimentación (Gutiérrez y De La Vara 2008).

La representación gráfica del modelo obtenido mediante un DDE se denomina superficie de respuesta, la cual describe el comportamiento de la variable respuesta en cada punto de la región experimental estudiada (Gutiérrez y De La Vara 2008). La metodología de superficie de respuesta (MSR) ha sido una herramienta útil para modelar y analizar problemas en la que una respuesta de interés está influenciada por múltiples variables (Tan *et al.* 2008).



Existe una gran diversidad de diseños experimentales, con diferentes aplicaciones a situaciones que ocurren en la práctica; dada la cantidad de alternativas, es necesario conocer la manera de elegir el más adecuado para una situación dada (Montgomery 2004).

Los cinco aspectos que influyen el momento de seleccionar un diseño experimental son:

- El objetivo del experimento
- El número de factores a estudiar
- El número de niveles que se estudian para cada factor
- El tipo de efecto que se desea investigar (relación factores-respuesta)
- El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

El objetivo del experimento se utiliza como un criterio general para clasificar a los diseños experimentales, mientras que los restantes cuatro aspectos son útiles para sub- clasificarlos.

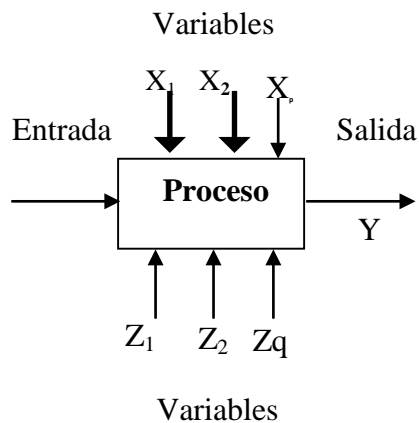
Prácticamente, en los campos del conocimiento se llevan a cabo los experimentos, con el objetivo de obtener información acerca de un proceso o de un fenómeno en particular. Los experimentos son series de pruebas que se controlan los factores de entrada en forma arbitraria, de manera que se puedan observar e identificar diferentes comportamientos en las respuestas de salida.

En ingeniería, por ejemplo, se puede utilizar la experimentación para el diseño de productos nuevos y la mejora de procesos, como el de manufactura. Los procesos, generalmente, involucran la combinación de factores que pueden ser controlables (por ejemplo,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3...$ ) y otros que pueden no serlo (pueden ser  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3...$ ) (Montgomery 2004).

Los objetivos del experimento pueden ser:

- Determinar los factores que tienen una mayor influencia sobre la respuesta Y
- Conocer la manera en que se pueden ajustar los factores controlables X para obtener un valor deseado en la respuesta Y
- Determinar los valores de los factores X que reduzcan la variabilidad de Y
- Determinar cuáles son los valores de los factores X que reduzcan al mínimo los efectos de variables no controlables Z.

Un esquema de un proceso que considera lo visto anteriormente, se presenta en la Figura 3.



**Figura 3: Esquema general de un proceso o sistema**

FUENTE: Montgomery (2004)

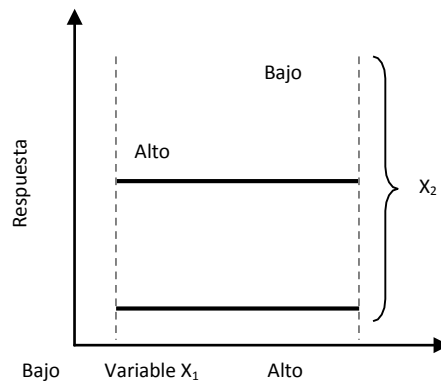
Existen diferentes estrategias para realizar los experimentos y poder observar cuál es el efecto de cada factor en la respuesta. Una de ellas, que es muy común, se denomina *enfoque o diseño experimental de un factor a la vez*, que consiste en cambiar un solo factor, de aquellos que son controlables, y mantener los mismos valores de los restantes, realizar el experimento y analizar la respuesta. Después se prueba reemplazando con otro factor. El objetivo es observar cómo influye el cambio de cada factor en la respuesta. Al final, se seleccionará el valor de cada factor que mejores resultados se obtuvo.

El trabajo bajo este enfoque tiene la desventaja de no considerar cualquier posible interacción entre los factores. En la Figura 4 se presenta un ejemplo de la interacción entre los factores  $X_1$  y  $X_2$  en la respuesta de un proceso.

Al observar la Figura 4, los factores  $X_1$  y  $X_2$  evidentemente están relacionados, pues la respuesta dependerá del nivel que tengan ambos factores en conjunto. Los *niveles* son los valores que se le asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental. La combinación de niveles de los factores estudiados se llama *tratamiento o punto de diseño*. Por ejemplo, si en el experimento se desea estudiar la influencia del valor de turbiedad y de la dosis de coagulante, y se desea probar cada una en dos niveles, entonces cada combinación de niveles (turbiedad, dosis de coagulante) es un tratamiento (Gutiérrez 2008).

Los valores bajo y alto del factor  $X_1$ , están representados en el eje de las abscisas, mientras que los valores del factor  $X_2$  están representados como líneas en el plano cartesiano. Una línea representa el comportamiento cuando  $X_2$  está en su nivel más bajo y la otra cuando se

encuentra en su nivel más alto.



**Figura 4: Interacción de los factores  $X_1$  y  $X_2$  sobre la respuesta**

En la Figura 4 se presenta el caso en el cual el factor  $X_2$ , prácticamente, no afecta en la respuesta si se encuentra en su valor alto, sin importar en qué nivel se encuentre el factor  $X_1$ . Pero, si el factor  $X_2$  se encuentra en su nivel bajo, la respuesta va a cambiar notablemente cuando en esta condición se encuentre con el valor bajo o con el valor alto de  $X_1$ .

Puede notarse en la figura descrita, que la respuesta es mayor cuando coincide el valor alto de  $X_1$  y el valor bajo de  $X_2$ . Esto es una interacción entre factores, que difícilmente podría ser observada por el enfoque o diseño experimental de un factor a la vez.

En estos casos, un enfoque adecuado que considera la posible interacción entre los factores es realizar el *diseño experimental factorial*. En este tipo de diseño, se hace variar un conjunto de factores al mismo tiempo.

El diseño experimental factorial es el que utiliza los datos experimentales más eficientemente, pues a través de reducidas observaciones, se puede conocer el efecto que tiene sobre la respuesta cada factor por sí solo, o en interacción con otro.

### **2.8.1 Diseño factorial**

Gutiérrez y De La Vara (2008) reportaron que el diseño factorial es útil para estudiar el efecto individual y la interacción de varios factores sobre una o varias respuestas; generalmente, se desea encontrar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor, expresado mediante la variable de respuesta.



### - **Diseño factorial $2^k$ con punto al centro**

Cuando en un diseño factorial  $2^k$ , los  $k$  factores se pueden estudiar en un nivel de prueba intermedio, es decir, un tratamiento adicional formado por la combinación del nivel medio de todos los factores. A este tipo de tratamiento se le conoce como *punto central*. Una razón por la que es deseable utilizar un punto central es aumentar el número de grados de libertad del experimento para calcular el error en el análisis de varianza (ANOVA).

Los grados de libertad se podrían aumentar con réplicas en el experimento, pero en ocasiones por cuestiones económicas el experimento se corre sin réplicas. Otra razón para utilizar el punto central es que las repeticiones en el centro permiten detectar la presencia, si la hay, de una curvatura en al menos uno de los factores que se estén estudiando. Esta curvatura se refiere a los efectos secundarios  $A^2$ ,  $B^2$ , etc. Una vez detectados estos efectos, el experimento se aumenta con más puntos experimentales para analizar esta curvatura (Gutiérrez 2008).

### **2.8.2 Diseño central compuesto**

Un diseño de MSR estándar es el diseño central compuesto (DCC), este diseño es adecuado para ajustar superficies cuadráticas y ayuda a optimizar las variables de respuesta con un número mínimo de experimentos, así como analizar la interacción entre parámetros (Tan *et al.* 2008). Generalmente, el DCC consiste en complementar un diseño factorial  $2^k$ , con  $2k$  puntos axiales y  $n_0$  puntos centrales, por lo que el número de experimentos se determina con la Ecuación (Gutiérrez y De La Vara 2008).

$$N = 2^k + 2k + n_0 \dots \dots \dots \text{(Ecuación 4)}$$

Gutiérrez y De La Vara (2008) reportaron que con el *Diseño Central Compuesto* (DCC) se puede construir a partir de un diseño factorial  $2^k$  agregando puntos sobre los ejes y al centro. Se considera un diseño de segundo orden; además, permite estudiar los efectos lineales y de interacción, analizar los efectos cuadráticos o de curvatura. Este tipo de diseños se emplean cuando se estudia una situación compleja o cuando se piensa que el punto óptimo de la respuesta se encuentra dentro de la región experimental, acotada por los niveles de los factores.

Un DCC tiene tres componentes:

- Una réplica de un diseño factorial  $2^k$ ; a esta parte se le llama porción factorial.

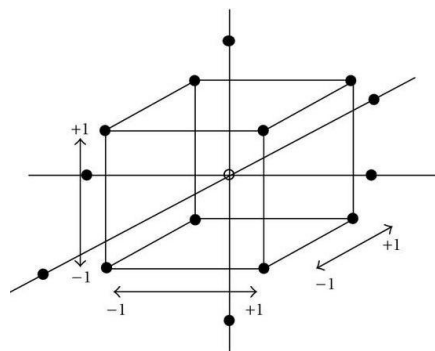
- Repeticiones en el punto central  $n_0$ , con  $n_0 \geq 1$
- Dos puntos sobre cada eje a una distancia  $\alpha$  del origen; a estos puntos se le llama *porción axial o diseño tipo estrella*.

La ortogonalidad y la rotabilidad aumentan la eficiencia de los diseños que las poseen, porque facilitan la interpretación de los parámetros estimados y de la superficie de respuesta.

Un diseño es ortogonal cuando los coeficientes estimados en el modelo ajustado no tienen ninguna correlación entre sí, lo cual provoca que se pueda conocer el efecto que tiene cada término y que se estime de manera más precisa. Un experimento es ortogonal si en la matriz de diseño todos los vectores columna son independientes entre sí. Una forma de verificar que en un diseño factorial completo  $2^k$  las columnas de su matriz son independientes: se multiplica dos columnas cualesquiera, término a término utilizando la notación -1 y +1 y el resultado es cero.

Un diseño es rotable si la varianza de  $\hat{Y}(x)$  solo depende de la distancia del punto  $x$  al centro de diseño y no de la dirección en que se encuentra; es decir, si se piensa en la variable  $\text{var}[\hat{Y}(x)]$  como otra respuesta, la gráfica de contornos tiene la forma de círculos concéntricos alrededor del centro del diseño. La rotabilidad del diseño hace que la calidad de la predicción, medida como  $\text{var}[\hat{Y}(x)]$ , no cambie sin importar que el diseño rote alrededor del mismo.

En la Figura 5 se muestra la representación de un DCC para el caso de tres factores.



**Figura 5: Representación de un DCC**

FUENTE: Gutiérrez y De La Vara (2008)

El número total de experimentos cuando se utiliza un DCC con  $k$  factores es de  $N = 2^k + 2k + n_0$ . El número de corridas al centro y la distancia de los puntos axiales ( $\alpha$ ) deben escogerse

dependiendo de las propiedades que se deseen para el DCC. Si se quiere que el diseño sea rotatable, entonces el valor de  $\alpha$  se determina:

$$\alpha = (F)^{1/4} \dots\dots\dots(\text{Ecuación 5})$$

Donde F es el número de puntos en la parte factorial. Si se desea que el DCC sea ortogonal se toma  $\alpha$  igual a:

$$\alpha = \left( \frac{(F \times N) - F}{2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(\text{Ecuación 6})$$

Donde N es el total de pruebas experimentales.

La ortogonalidad y la rotabilidad aumentan la eficiencia de los diseños que las poseen, porque facilitan la interpretación de los parámetros estimados y de la superficie de respuesta.

**- Metodología de la superficie de respuesta**

La metodología de superficie de respuesta (MSR) es la estrategia experimental y de análisis que permite encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, es decir, aquellas que dan como resultado “valores óptimos” de una o varias características de calidad del producto.

Las superficies de respuesta se caracterizan ajustando un modelo a los datos experimentales. Los modelos que se utilizan en MSR son básicamente polinomios. Con base en lo anterior, si se tiene un número de factores  $k$  el *modelo de primer orden*, que solo analiza efectos individuales está dado por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon \dots\dots\dots(\text{Ecuación 7})$$

El *modelo de segundo orden*, que permite estudiar, además de los efectos lineales y de interacción, los efectos cuadráticos o de curvatura pura, tiene la siguiente representación es:

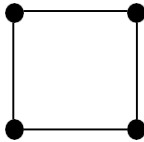
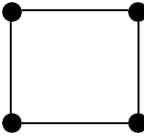
$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \dots\dots\dots(\text{Ecuación 8})$$

Existe una relación directa entre el tipo de modelo que se pretende ajustar y el tipo de diseño que se debe correr. Un diseño factorial completo  $2k$  sólo será útil para estimar e incluir en el

modelo los efectos principales e interacciones dobles, sin que se pueda estimar términos cuadráticos puros. Si al diseño factorial se le agregan repeticiones al centro ( $2k + \text{centro}$ ), en el modelo se puede incluir solo uno de los términos cuadráticos puros, cualesquiera de ellos. Las repeticiones en el centro no son suficientes para conocer cuál o cuáles de los términos cuadráticos está activo, pero sí permite detectar la presencia de curvatura. Si el modelo se aumenta con puntos estrella o axiales, es posible estudiar de manera separada los efectos cuadráticos puros e incluirlos a todos, si fuera necesario, en el modelo ajustado (Gutiérrez 2008).

En la Tabla 6 se presentan diferentes tipos de diseño experimental y el modelo asociado cuando se estudian solo dos factores

**Tabla 6: Relación modelo-diseño experimental**

| Diseño   | Modelo asociado  |
|--|--|
| <p data-bbox="448 987 560 1016">Factorial</p>                       | $Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon$ <p data-bbox="999 1099 1185 1128">(primer orden)</p>  |
| <p data-bbox="352 1234 724 1263">Factorial con punto al centro</p>  | $Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \text{curvatura} + \varepsilon$ $\text{Curvatura} = \beta_{11}x_1^2 \text{ o } \beta_{22}x_2^2$            |
| <p data-bbox="264 1525 735 1554">Factorial con centro y puntos axiales</p>   | $Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}^2x_1^2 + \beta_{22}^2x_2^2 + \varepsilon$ <p data-bbox="991 1626 1198 1655">(segundo orden)</p> |

FUENTE: Gutiérrez (2008)



### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1 ZONA DE ESTUDIO**

Las muestras de agua colectadas fueron del embalse Cuchoquesera-Chuschi-Cangallo-Ayacucho y el desarrollo de la parte experimental se efectuó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental UNALM.

##### **3.1.1 Aspectos generales del embalse**

El embalse Cuchoquesera fue diseñado para una capacidad máxima de 80 Hm<sup>3</sup>, área de riego de 14 393 ha y generación de energía eléctrica mediante la central Campanayoc para proveer energía eléctrica a la ciudad de Huamanga. El esquema hidráulico del embalse Cuchoquesera se presenta en la Figura 31.

##### **3.1.2 Ubicación**

El embalse Cuchoquesera se encuentra ubicada en el departamento de Ayacucho, entre las provincias de Huamanga y Cangallo, en los distritos de Vinchos y Chuschi, enmarcados dentro de la cuenca del río Chalhuamayo, en áreas que pertenecen a las comunidades de Quispillacta (barrio Cuchoquesera y Pampamarca), Condorpaccha y Putacca; geográficamente, se localiza entre las coordenadas UTM 571 820 N a 574 000 N y 8 515 165 E a 8 513 220 E, a una altitud de 3 740 m.s.n.m.

El acceso hacia el embalse es por la vía Libertadores Wari (Pisco - Ayacucho), desviándose por las inmediaciones de la zona de Rosaspata, ubicada aproximadamente a unos 40 km de la ciudad de Ayacucho. Desde Rosaspata existen 22 km de distancia hacia el embalse. En la Figura 6 se presenta el mapa de ubicación del embalse Cuchoquesera.

##### **3.1.3 Características de la zona de estudio**

El área de estudio presenta un relieve suave y amplio, ligeramente inclinado hacia el sector occidental y limitado por laderas con pendientes que varían de 10° a 35° en sus partes altas. En el terreno predominan depósitos limo-arcilloso con espesor que varían de 0,50 a 3,0 m y depósitos aluviales de 2,0 a 6,0 m de espesor, cubierto por vegetación natural.

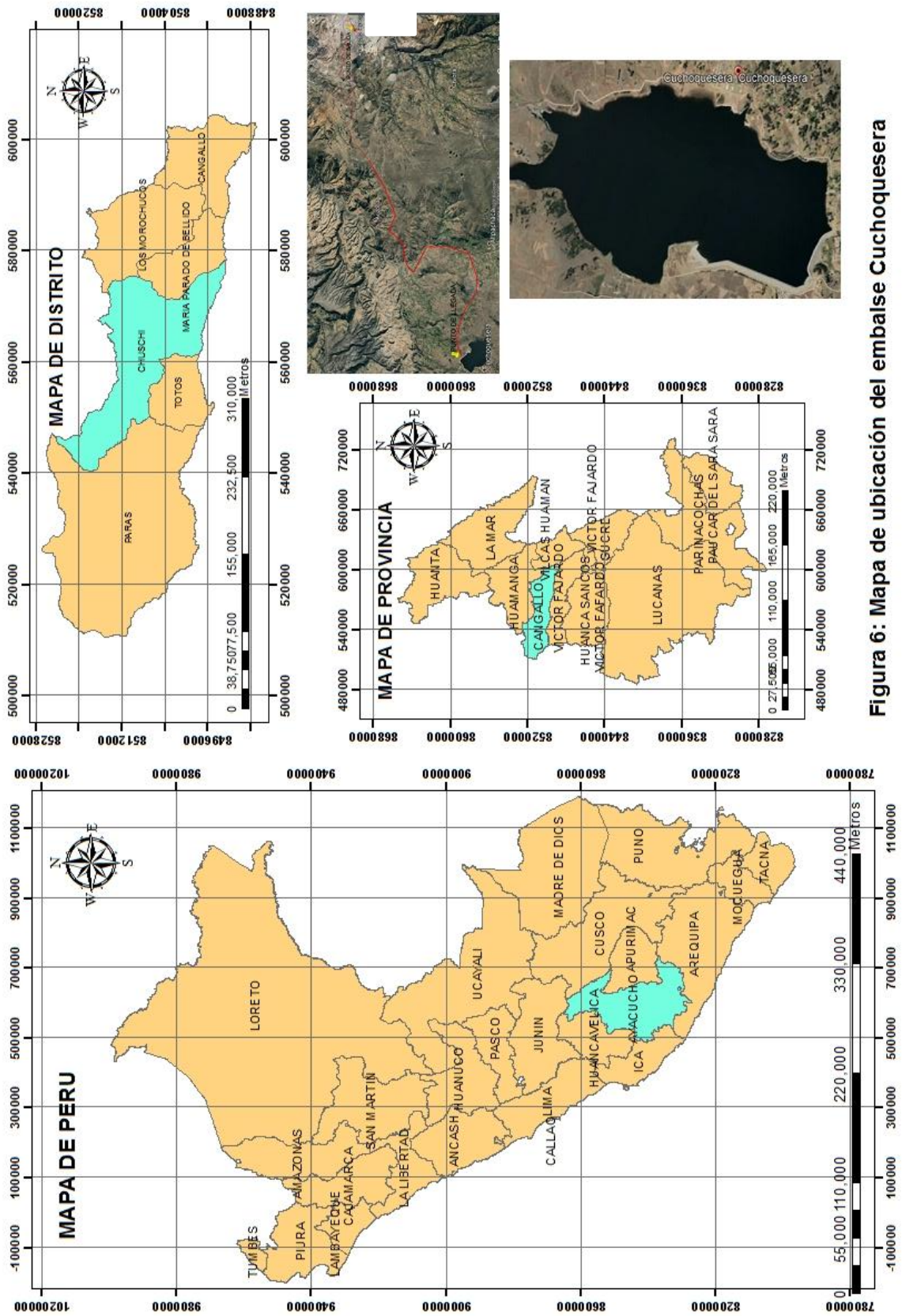


Figura 6: Mapa de ubicación del embalse Cuchoquesera

El clima que predomina en la zona del embalse es característico de la zona de la Puna, donde la temperatura mínima varía entre  $-7,6$  a  $0^{\circ}\text{C}$ , la temperatura máxima registrada en la estación Cuchoquesera es de  $24^{\circ}\text{C}$ , la temperatura media es de  $8^{\circ}\text{C}$ , aproximadamente. Las horas de sol varían entre 5,5 a 9 horas diarias. Los meses de lluvia se presentan, generalmente, de diciembre a marzo, alcanzando hasta 890 mm de precipitación promedio anual. La evaporación promedio registrada es de 1 209 mm en la zona del embalse, en la Figura 7 se presenta las características de la zona de estudio.



**Figura 7: Características de la zona de estudio**

#### **3.1.4 Aspectos técnicos de diseño del embalse**

Los aspectos técnicos del diseño del embalse Cuchoquesera se detallan en la Tabla 7.

**Operación del embalse.** El llenado del embalse se realiza en el periodo de avenidas y la descarga en la época de estiaje; el caudal de descarga responde a las necesidades de la población (agricultura y dotación de agua potable); el caudal máximo de descarga es de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (Vilca 2009).

**Tabla 7: Aspectos técnicos de diseño del embalse Cuchoquesera**

|  |          |
|--|----------|
| Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )                                 | 34,4     |
| Precipitación media anual en estación Cuchoquesera (mm)              | 890      |
| Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /s)                                 | 8,6      |
| Avenida de diseño (Tr=1000), entrada del embalse (m <sup>3</sup> /s) | 154,67   |
| Avenida de descarga laminada (m <sup>3</sup> /s)                     | 9,3      |
| Nivel de agua máxima operativa (NAMO) (m.s.n.m.)                     | 3 741,70 |
| Nivel de agua máximo extraordinario (NAME) (m.s.n.m.)                | 3 742,62 |
| Nivel de agua mínimo operativo (NAMI) (m.s.n.m.)                     | 3 714,69 |
| Volumen útil (Hm <sup>3</sup> )                                      | 80,00    |
| Espejo liquido en el NAMO (km <sup>2</sup> )                         | 4,22     |
| Espejo liquido en el NAMI (km <sup>2</sup> )                         | 0,44     |

FUENTE: Vilca (2009)

### 3.2 MATERIALES Y REACTIVOS

#### a. Agua cruda utilizada en las pruebas

Las pruebas de coagulación-floculación se realizaron utilizando las aguas colectadas en el embalse Cuchoquesera. Previamente, para cada prueba del laboratorio, el agua cruda se caracterizó registrando los parámetros: pH, color, turbiedad, sólidos suspendidos totales y conductividad eléctrica. En la Tabla 8 se muestra las estaciones de muestreo de agua.

**Tabla 8: Estaciones de muestreo de agua**

| Estaciones<br>Código | Altura<br>(m.s.n.m.) | Coordenadas UTM |         |
|----------------------|----------------------|-----------------|---------|
|                      |                      | Sur             | Oeste   |
| PM1                  | 3750                 | 570986          | 8514368 |
| PM2                  | 3751                 | 571049          | 8513681 |
| PM3                  | 3754                 | 573154          | 8513336 |
| PM4                  | 3753                 | 572437          | 8515021 |

#### b. Coagulantes y floculantes

Se registraron los contactos con los principales proveedores de coagulantes y floculantes en el Perú (en particular, sulfato de aluminio, sulfato ferroso, cloruro férrico y polímeros orgánicos).

Los coagulantes y floculantes utilizados en el estudio se preseleccionaron tomando como base el criterio de seguridad sanitaria de los productos utilizados. Las sustancias activas debieron estar aprobadas por el responsable de laboratorio para su uso seguro en el tratamiento del agua potable.

### **3.2.1 Materiales**

#### **a. Materiales de laboratorio y campo**

- Muestras de agua del embalse.
- Equipo de filtración: embudo, porta filtro y recipiente para recibir el filtrado.
- Balanza analítica.
- Frascos para muestras.
- Filtro de fibra de vidrio.
- Estufa.
- Bomba de vacío para equipo de filtración.
- Agua destilada.
- Cámara fotográfica.
- Equipo de prueba de jarras.
- Sulfato de aluminio.
- Sulfato ferroso.
- Cloruro férrico.
- Goma de tuna.
- Harina de tara.
- Desecador.
- Porcelanas.
- Crisol.
- Pinza para crisol.
- Probetas de 100 ml.
- Pissetas de 500 y 250 ml.
- Guantes de látex.
- GPS.
- Pluviómetros.
- Equipo multiparámetro.
- Turbidímetro.

- Software: Google earth, Arc Gis, AutoCAD, Hojas de cálculo.
- Carta nacional.

### **3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

En el trabajo se utilizó el método científico, de tipo experimental, habiéndose evaluado el efecto de la dosificación de coagulantes y floculantes en los parámetros físicos-químicos de la calidad de agua (turbidez, volumen de lodos, partículas no sedimentables, conductividad eléctrica, pH y color) en el embalse Cuchoquesera; y, de nivel explicativo el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa – efecto (Orellana 2013).

#### **3.3.1 Diseño de investigación – nivel de investigación**

El estudio comprende al diseño de investigación experimental, de alcance descriptivo, en el que se describe las características físicas y químicas, habiéndose determinado la calidad de las aguas almacenadas en el embalse Cuchoquesera; lo que se explica básicamente las relaciones causa – efecto (Orellana 2013).

#### **3.3.2 Variables e indicadores**

- a. Variables independientes (X):** dosis de coagulante, dosis de floculante, turbidez inicial.
- b. Variable dependiente (Y):** remoción de sedimentos (partículas no sedimentables).
- c. Indicadores**

Cantidad de sulfato de aluminio, sulfato férrico, cloruro férrico, goma de tara, polvo de tuna, turbiedad, partículas no sedimentables, color, conductividad eléctrica y pH.

#### **3.3.3 Población y muestra**

##### **- Población**

Es el volumen total de agua del embalse Cuchoquesera.

##### **- Muestra**

La muestra de agua del embalse Cuchoquesera, regulador de volúmenes de agua de la planta de tratamiento de Quicapata – Ayacucho, EPSASA.

## **3.4 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AGUA**

### **3.4.1 Determinación de la turbidez**

La turbidez del agua se debe a la presencia de partículas insolubles, limo, partículas orgánicas de diferente origen, plancton y otros organismos microscópicos que impiden el paso de la luz a través del agua. La turbidez mayor de 5 UTN es perceptible para el consumidor y proporciona una guía para la producción de agua aceptable para consumo humano.

La turbidez es la medida de las propiedades de transmisión de la luz en el agua, siendo otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales, en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. Los elevados niveles de turbidez pueden proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección y estimular la proliferación de bacterias. La alta turbidez suele asociarse con altos niveles de microorganismos como virus, parásitos y algunas bacterias. Estos organismos pueden provocar síntomas tales como náuseas, diarreas y dolores de cabeza (DIGESA 2008).

#### **Procedimiento**

##### **Pre tratamiento de la muestra**

**a. Eliminación de interferencias burbujas de aire.** Las burbujas influyen en la determinación de la turbidez y deben ser eliminadas si se encuentran en la muestra o adheridas a un lado de la celda, estas pueden ser removidas aplicando al vacío. Este método es ideal porque no alteró los sólidos de la muestra; brevemente se sumergió el final de la celda con la muestra en un baño ultrasónico, con lo que se purga la muestra de burbujas.

**b. Medida de turbidez de la muestra.** Las condiciones de la celda para la muestra son importantes, las huellas pueden interferir en la determinación especialmente si se mide una turbidez baja. Se limpia la celda evitando usar algodón. Se calibra el equipo de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Se enjuaga la celda varias veces con la solución a analizar, llenar la celda con aproximadamente 25 ml de la muestra y secar con un paño libre de algodón, eliminando las burbujas de aire de la celda, colocar la celda en el equipo y leer directamente la turbidez.

### 3.4.2 Color

Por la comparación visual de la muestra con soluciones coloreadas de concentraciones conocidas o discos de cristal de color calibrados previamente con soluciones preparadas. La unidad para la medición del color que se usa como estándar, es el color que produce 1 mg/l de platino en la forma de cloroplatinato. La relación de cobalto a platino, se puede variar para igualar el matiz. La proporción Pt-Co que se utiliza en este método es normalmente la adecuada para la mayoría de las muestras. El color puede cambiar con el pH de la muestra, siendo necesario medir el color y que se reporte también el pH de la muestra. En caso necesario la muestra se centrifuga para eliminar la turbidez. La comparación se realiza con las soluciones que tengan colores de 5, 10 y hasta 70 unidades contenidas en tubos nessler.

#### Análisis de la muestra

- **Color aparente.** Se lee la absorbancia de la muestra a 456 nm sin ningún tratamiento previo, en un espectrofotómetro y se observa el color en la curva patrón. Si el color excede la concentración de la curva patrón, se diluye la muestra con agua destilada, tomando una alícuota y midiendo 50 ml, luego se determina la absorbancia de la muestra diluida y se mide el pH.

- **Color real.** Por medio de una centrifuga, se separa la turbidez presente en la muestra. El tiempo requerido de centrifugación depende de la naturaleza de la muestra y la velocidad de centrifugación. Se compara la muestra centrifugada con agua destilada para asegurar que la turbidez ha sido removida. La lectura de absorbancia de la muestra tratada en el espectrofotómetro y se determina el color de la misma manera determinándose el color aparente.

### 3.4.3 Volumen de lodos

Las partículas sólidas presentes en el agua, se sedimentan debido a su densidad o permanecen flotando en ella. Estas materias sedimentadas pueden ser determinadas y reportadas en peso o en volumen.

#### Procedimiento

- Agitado de la muestra y vertido de un litro de esta en un cono de Imhoff.
- Dejar sedimentar por 45 minutos.



- Agitado del líquido contenido en el cono mediante la rotación del mismo, para el desprendimiento y sedimentación de los sólidos de la pared del recipiente.
- Dejar sedimentar durante 15 minutos adicionales.
- Registrar la cantidad de sólidos sedimentables en ml/L, con lectura directa en el cono.

#### **3.4.4 Determinación de pH**

Con el método se evalúa el valor pH del agua, sea ácido o alcalino. La escala del pH de las aguas naturales está entre 6,0 y 8,5. Si el agua tiene  $\text{pH} = 7$ , está en el punto medio de la escala y se considera que tiene un pH neutro. El valor del pH es de importancia en los procesos de tratamiento como la cloración, la coagulación y el ablandamiento.

##### **Procedimiento**

- Mantener el electrodo en el agua destilada por lo menos durante 4 horas si la membrana de vidrio está seca.
- Si la solución de referencia interna del electrodo está en un nivel inferior de 5 cm de altura se llena con KCl 3 M, hasta un cm por debajo del orificio de llenado.
- Examinar cuando existe burbujas de aire atrapadas, si está presente agitar suavemente hasta que desaparezca.
- Lavar con agua destilada el bulbo de vidrio del electrodo, eliminando el exceso de agua del bulbo con agitación suave (no secar con un papel o tela ni tocar con los dedos la superficie del electrodo), luego conectar el electrodo al pH-metro.
- Calibrar el equipo con las soluciones *buffer* de acuerdo con las indicaciones del fabricante.
- Sumergir el bulbo del electrodo en un *beaker* que contenga la muestra y esperar que el equipo se estabilice para la lectura.
- Lectura del pH que indica el equipo.

#### **3.4.5 Partículas no sedimentables**

##### **- Sólidos totales (ST)**

La determinación gravimétrica de sólidos totales consistió en la evaporación de 200 ml de muestra homogenizada en una cápsula de porcelana previamente pesada y secada en una

estufa a temperatura constante de 103 – 105°C, hasta que el peso de la cápsula sea constante. El aumento de peso en la cápsula representó el contenido de ST.

#### **3.4.6 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica de una solución es la medida de la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica y permite conocer la concentración de especies iónicas presentes en el agua. Como la contribución de cada especie iónica a la conductividad es diferente, su medida dará un valor que no está relacionado, de manera sencilla, con el número total de iones en solución; lo que depende, también, de la temperatura.

La conductividad eléctrica en las aguas naturales se correlaciona con la cantidad de sólidos disueltos ya que estos en su mayoría son compuestos iónicos de calcio y magnesio. La presencia de altas concentraciones de estas sales afecta la vida acuática y en el caso del riego afecta a la fisiología de las plantas y a la calidad de los suelos.

### **3.5 PRECIPITACIÓN**

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, su medición y análisis, forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua (Villón 2002).

También, Duan y Gregory (2003), afirmaron que en las aguas superficiales existen partículas que pueden provenir de la degradación del suelo o de fuentes atmosféricas; y otras son productos de procesos químicos y biológicos llevados a cabo dentro del cuerpo de agua. Las partículas incluyen a las arcillas, limos, asbestos, precipitados de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ , algas, organismos patógenos y hasta restos de organismos acuáticos.

En el perímetro del embalse Cuchoquesera, se instalaron cuatro estaciones pluviométricas distribuidas uniformemente, siendo las lecturas diarias y se determinó la precipitación.

### **3.6 PRUEBA DE JARRAS DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACION**

Existen diferentes metodologías propuestas para la realización de la prueba de jarras, sin embargo, debido a la cantidad de variables en la coagulación – floculación y a las diferentes calidades de agua que se pueden tener, la prueba de jarras seguirá siendo un método empírico y difícil de estandarizar (Hendricks 2006).

La metodología general que se empleó para la realización de las pruebas de jarras se describe a continuación:

- a) Realizar las mezclas de agua cruda para obtener el valor inicial de turbiedad
- b) Tomar lectura de los parámetros iniciales del agua a tratar (pH, temperatura, turbiedad, SST y color)
- c) Verter 1 L de agua cruda homogeneizada en cada una de las jarras del equipo
- d) Agitar el agua ajustando el controlador de velocidad del equipo de jarras
- e) Adicionar el volumen correspondiente de coagulante para alcanzar la dosis requerida
- f) Adicionar la correspondiente dosis de floculante
- g) Ajustar el cronómetro a cero y contar a partir de este momento el tiempo de sedimentación
- h) Determinar la turbiedad de las muestras colectadas
- i) Tomar una alícuota de 200 mL al minuto 60 de sedimentación y transferirla a un vial para determinar el contenido de sólidos suspendidos totales presentes en el agua tratada, así como los valores finales de color y turbiedad
- j) Medir el pH y la temperatura en el agua que queda en cada jarra
- k) Agitar el agua restante en las jarras 1 min más a 60 rpm para suspender los flóculos
- l) Transferir cuidadosamente el agua de cada jarra a un cono Imhoff
- m) Después de 30 min de sedimentación en los conos Imhoff medir el volumen de lodos.

### **3.6.1 Diseño de experimentos**

Se emplearon los diseños experimentales para desarrollar las pruebas de laboratorio de coagulación-floculación, siendo el diseño para la época de lluvias, no habiendo sido necesario para la época de estiaje.

#### **- Tipo de diseño, factores, niveles y tratamientos**

Se realizaron las pruebas de jarras basados en un diseño experimental del tipo central compuesto (DCC). Los factores que se emplearon en el experimento fueron la dosis de coagulante, la dosis de floculante y el valor inicial de turbidez. Las dosis de coagulante y floculante fueron seleccionados como factores, por ser los agentes que permiten la desestabilización y aglomeración de la materia suspendida del agua (Bolto y Gregory 2007) y la turbidez se seleccionó por ser el parámetro principal con el objetivo de remover por la

coagulación-floculación. El número de experimentos que comprende la matriz experimental se determinaron mediante la ecuación 4, resultando en 16 tratamientos realizados.

Para la evaluación de los coagulantes-floculantes se emplearon las combinaciones de valores codificados de los tres factores evaluados en los 16 tratamientos realizados: dosis de coagulante, dosis de floculante y nivel de turbiedad; los valores de estos factores se representan de manera codificada (-á, -1, 0, 1, á), lo que permite simplicidad para efectuar los cálculos en el análisis estadístico (Gutiérrez y De La Vara 2008):

$$\acute{\alpha} = \left( \frac{F \times N - F}{2} \right)^{1/2} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 9)}$$

F = número de puntos en la parte factorial.

N = total de pruebas experimentales.

En la Tabla 9 se presenta la matriz experimental codificada del DCC.

**Tabla 9: Matriz experimental codificada del DCC, para las pruebas de coagulación-floculación del agua cruda del embalse Cuchoquesera**

| Tratamiento | Factores de diseño |            |          |
|-------------|--------------------|------------|----------|
|             | Coagulante         | Floculante | Turbidez |
| 1           | 0,00               | -1,29      | 0,00     |
| 2           | 0,00               | 0,00       | -1,29    |
| 3           | 0,00               | 0,00       | 0,00     |
| 4           | 0,00               | 0,00       | 0,00     |
| 5           | -1,00              | 1,00       | 1,00     |
| 6           | -1,00              | -1,00      | -1,00    |
| 7           | 0,00               | 0,00       | 1,29     |
| 8           | -1,00              | 1,00       | -1,00    |
| 9           | 0,00               | 1,29       | 0,00     |
| 10          | 1,29               | 0,00       | 0,00     |
| 11          | -1,29              | 0,00       | 0,00     |
| 12          | -1,00              | -1,00      | 1,00     |
| 13          | 1,00               | -1,00      | -1,00    |
| 14          | 1,00               | 1,00       | 1,00     |
| 15          | 1,00               | -1,00      | 1,00     |
| 16          | 1,00               | 1,00       | -1,00    |

Los valores reales correspondientes a la matriz codificada para los factores de diseño se presentan en la Tabla 10. Las dosis de los coagulantes y floculantes fueron seleccionadas tomando en consideración las especificaciones proporcionadas por las empresas fabricantes. Los valores de turbiedad se seleccionaron en base a los datos promedio mensual de turbiedad

registrados en la planta de tratamiento de agua potable de Quicapata-Ayacucho, durante la época de lluvias (Figura 23).

**Tabla 10: Valores codificados y reales de los factores empleados en el DCC, para las pruebas de coagulación-floculación del agua cruda del embalse Cuchoquesera**

|                           | Niveles |      |    |      |      |
|---------------------------|---------|------|----|------|------|
| Factores                  | -1,29   | -1   | 0  | 1    | 1,29 |
| <b>Coagulantes (mg/L)</b> |         |      |    |      |      |
| Sulfato de aluminio       | 10      | 19   | 50 | 81   | 90   |
| Sulfato ferroso           | 10      | 20,1 | 55 | 89,9 | 100  |
| Cloruro férrico           | 6       | 8,7  | 18 | 27,3 | 30   |
| <b>Floculantes (mg/L)</b> |         |      |    |      |      |
| Goma de tara              | 1       | 1,5  | 3  | 4,6  | 5    |
| Polvo de tuna             | 15      | 19,5 | 35 | 50,5 | 55   |
| Turbidez (UTN)            | 10      | 26   | 80 | 134  | 150  |

Las variables de respuesta que se cuantificaron para las pruebas fueron el volumen de lodos, la turbiedad y color residual. Los resultados experimentales fueron introducidos en el programa informático R para realizar el análisis estadístico y la obtención de los modelos matemáticos para el cálculo de los valores óptimos de los factores de diseño que permitan la máxima remoción de las variables de respuesta seleccionados en el estudio.

### 3.7 TÉCNICAS ANALÍTICAS

En la Tabla 11 se muestran los parámetros fisicoquímicos del agua, con el respectivo método, habiéndose cuantificado durante las pruebas experimentales de los procesos de coagulación-floculación-sedimentación.

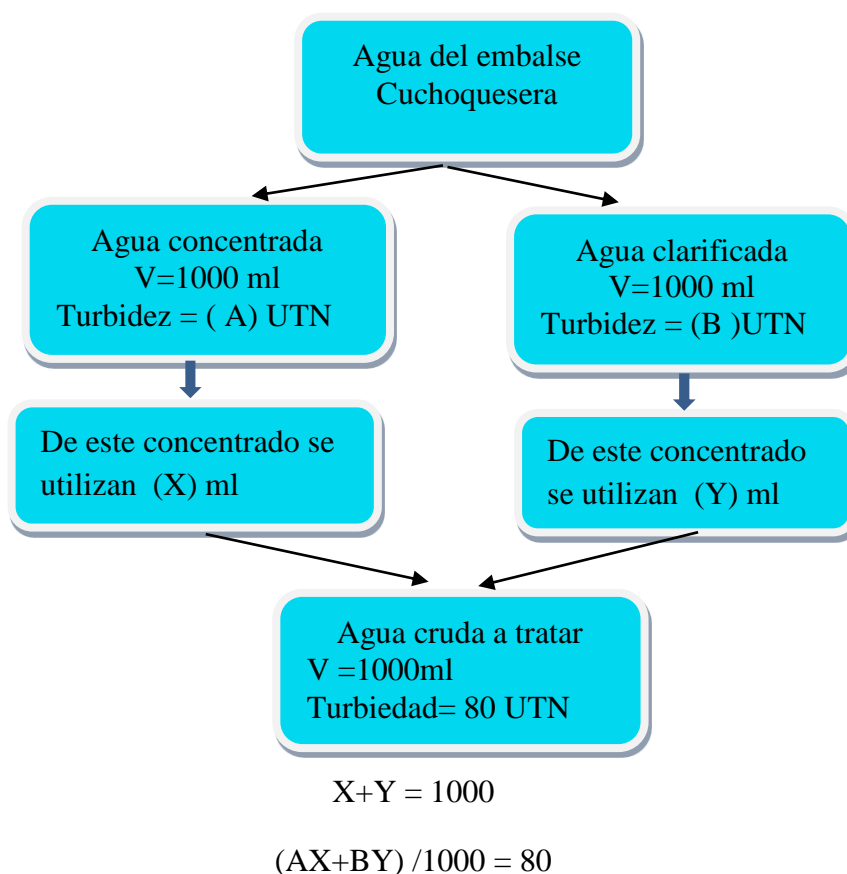
Los parámetros de color aparente, turbiedad, conductividad eléctrica y pH, fueron registrados directamente, a partir de las muestras tomadas de cada experimento. Para la cuantificación del lodo producido por efecto de la coagulación-floculación, se emplearon conos *Imhoff*. Una vez terminada la etapa de sedimentación, se procedió con vaciar el contenido de los vasos de precipitado de las pruebas de jarras a los conos donde se determinó el volumen de lodos producidos.

En la Figura 8 se presenta el diagrama del procedimiento empleado para preparar las mezclas de agua a tratar, realizando un balance de materia con base en la turbidez del agua muestreada.

**Tabla 11: Técnicas utilizadas para la determinación de los parámetros fisicoquímicos**

| Parámetro, unidad de medida        | Técnica                            | Materiales y equipos   |
|------------------------------------|------------------------------------|--|
| Sólidos suspendidos totales (mg/L) | APHA <i>et al.</i> 1995. 2540C     | Filtro de fibra de vidrio<br>Whatman GF/A de 55 mm<br>Balanza analítica OHAUS Explorer |
| Turbiedad (UTN)                    | APHA <i>et al.</i> 1995. 2130B     | Turbidímetro Turbiquant<br>1000 IR de Merck  |
| pH                                 | APHA <i>et al.</i> 2005<br>4500H+B | Equipo multiparámetro<br>Orion 4 Star  |
| Color (UPt-Co)                     | HACH Company, 1998.<br>Método 8025 | Espectrofotómetro HACH<br>DR/2010  |
| Volumen de lodos (ml/L)            | 2540F (APHA <i>et al.</i> 1998)    | Conos Imhoff   |

FUENTE: APHA y AWWA (2005)



**Figura 8: Procedimiento de preparación de una muestra de agua utilizada en las pruebas**

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 VARIABILIDAD DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AGUA EN EL EMBALSE

El estado y las características del agua del embalse Cuchoquesera se presentan en la Tabla 12.

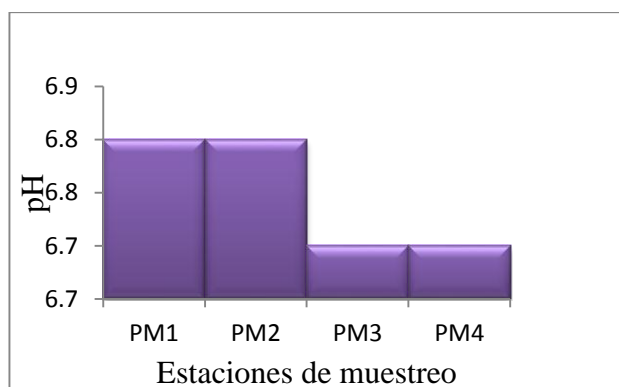
**Tabla 12: Valores promedio de variables medidas**

| Numero de muestra | T (UTN) | C (U Pt-Co) | VL (ml/L) | pH  | PNS (mg/L) | Conductividad ( $\mu$ S/cm) |
|-------------------|---------|-------------|-----------|-----|------------|-----------------------------|
| PM1               | 3       | 19          | 0,0       | 6,8 | 206        | 183                         |
| PM2               | 21      | 37          | 0,2       | 6,8 | 239        | 173                         |
| PM3               | 7       | 33          | 0,1       | 6,7 | 255        | 169                         |
| PM4               | 1       | 13          | 0,0       | 6,7 | 253        | 170                         |

FUENTE: Informe del Laboratorio de Ingeniería Ambiental UNALM 2018

#### 4.1.1 pH

En general, el pH del agua en el embalse Cuchoquesera presenta una tendencia a la neutralidad y permanece casi constante, estando comprendidos los valores observados dentro del rango permisible (pH 6,7 a 6,8) que se presenta en la Tabla 12 y Figura 9. Se ubica dentro del rango requerido en los Límites Máximos Permisibles del Reglamento de la Calidad de Agua para consumo humano fijado en el DS N° 031-2010-SA y la OMS.

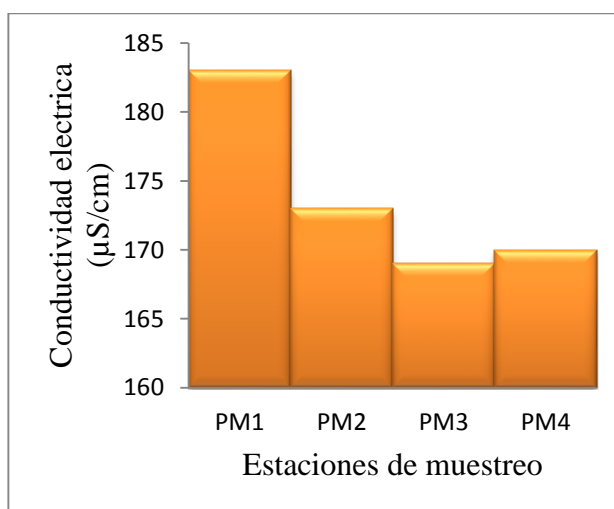


**Figura 9: pH del agua en las estaciones de muestreo**

### 4.1.2 Conductividad eléctrica

En la Figura 10 y Tabla 12 se observa los valores de la presencia de sales disueltas en el agua que se expresa en la CE que generan los iones de sales disueltas; en tal sentido, dichas mediciones establecen valores del orden de 169 a 183  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ubicado dentro de los valores promedio obtenidos, siendo los valores relativamente bajo, comparados con la normatividad vigente.

Los resultados obtenidos concuerdan con la realidad, siendo los valores de PM2=173 y PM3=169  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; porque de las zonas contiguas a estos puntos, ingresa las aguas del Proyecto Cachi, que se almacena en el embalse Cuchoquesera, que transportan partículas no sedimentables, tal como se muestra en el Plano 4. En todas las estaciones de muestreo la cantidad de conductividad eléctrica se encuentran por debajo de los valores límite del ECA de agua y se ubica entre los valores que fija el Reglamento de la Calidad de Agua para consumo humano DS N° 031-2010-SA, siendo el límite máximo permisible menor a 1 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



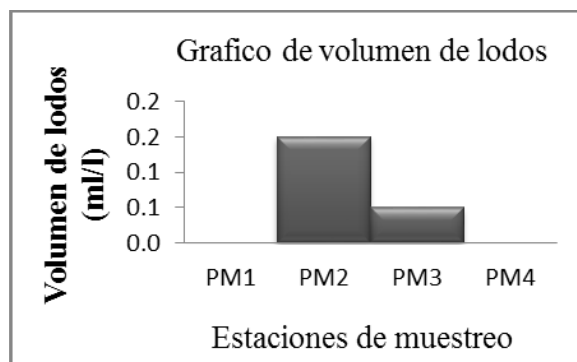
**Figura 10: Conductividad eléctrica del agua en las estaciones de muestreo**

### 4.1.3 Volumen de lodos

En la Figura 11 y Tabla 12 se observa los valores de los sólidos sedimentables de las muestras de agua que varían de 0 a 0,2 mg/L, debiendo ser cero para consumo humano.

El contenido de sólidos sedimentables de las aguas del embalse Cuchoquesera es muy bajo dado que en muchas de las estaciones no superaron el valor mínimo de cuantificación del cono de *Imhoff* y las otras estaciones presentaron valores menores a 0,2 mg/L.



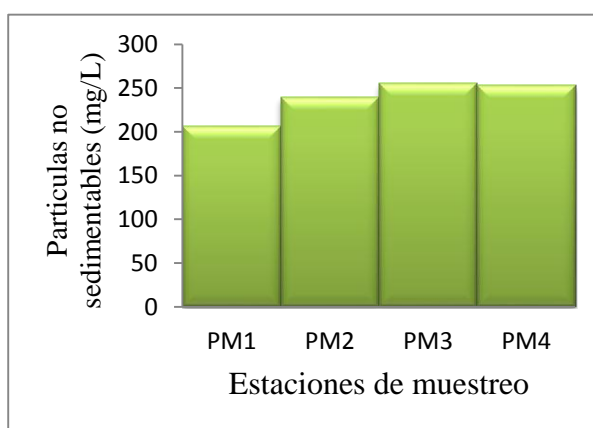


**Figura 11: Volumen de lodos del agua en las estaciones de muestreo**

#### 4.1.4 Sólidos disueltos y suspendidos

La concentración de partículas no sedimentables (PNS) presenta valores promedio del orden de 206 a 255 mg/L (Figura 12 y Tabla 12).

Las partículas no sedimentables presentan marcadas fluctuaciones en todas las estaciones muestreadas del agua en el embalse Cuchoquesera, habiéndose presentado en las estaciones PM2 y PM3 mayores valores como se muestra en el Plano 5. Los sólidos totales disueltos, de acuerdo al Reglamento de la Calidad de Agua para consumo humano fijado en el DS N° 031-2010-SA, los límites máximo permisible deben ser menores a 1 000 mg/L.

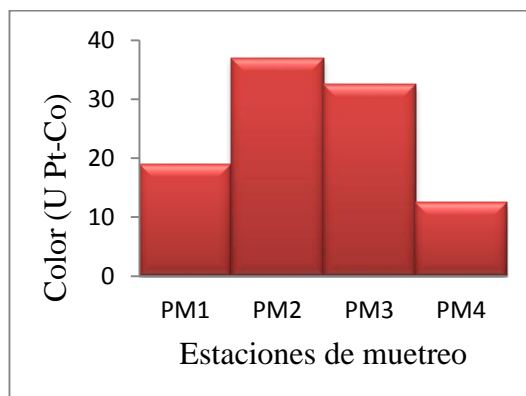


**Figura 12: Partículas no sedimentables del agua en las estaciones de muestreo**

#### 4.1.5 Color

Los valores de color del agua del embalse Cuchoquesera se muestra en la Figura 13 y Tabla 12, habiéndose utilizado un colorímetro digital para medir el color en cada una de las cuatro muestras del agua del embalse, presentando las estaciones PM1, PM2, PM3 y PM4 valores de 19, 37, 33 y 13 UPt-Co, respectivamente, tal como se observa en el Plano 3.

Observando los valores de las cuatro estaciones, las estaciones PM1, PM2 y PM3 que fueron muestreados reportaron valores que exceden el límite máximo permisible estipulado en el DS N° 031-2010-SA que es de 15 UPt-Co, no siendo apto para el consumo humano por los colores que presenta el agua del embalse.

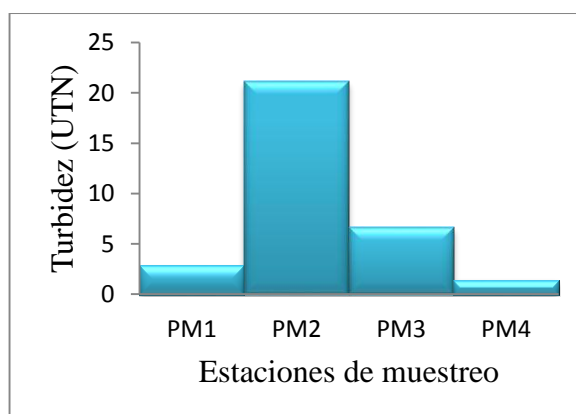


**Figura 13: Color aparente en el agua de las estaciones de muestreo**

#### 4.1.6 Turbidez

Los valores de turbidez del agua en el embalse Cuchoquesera se muestra en la Figura 14 y Tabla 12, habiéndose utilizado un turbidímetro digital para medir la turbidez en cada una de las cuatro muestras de agua del embalse, presentando las estaciones PM1, PM2, PM3 y PM4 valores de 3, 21, 7 y 1 UNT, respectivamente, tal como se observa en el Plano 2.

Observando los valores de las cuatro estaciones, las estaciones PM2 y PM3 que fueron muestreados reportaron valores que exceden el límite máximo permisible estipulado por la OMS y Reglamento de la Calidad del Agua para consumo humano del DS N° 031-2010-SA que es de 5 UTN (unidades de turbidez nefelométricas), no siendo apto para el consumo humano por la turbiedad que presenta el agua del embalse.



**Figura 14: Turbidez del agua en las estaciones de muestreo**

## **4.2 PRECIPITACIÓN**

Se instalaron cuatro estaciones pluviométricas en puntos estratégicos del perímetro del espejo de agua en el embalse Cuchoquesera, observándose en las Figuras 20, 21 y 22 los valores de la precipitación; el registro en las estaciones pluviométrica se realizó de febrero a mayo del 2018 y el resultado se muestra en el Plano 1; del registro se deduce que la precipitación no es uniforme en el espejo de agua del embalse.

## **4.3 COMBINACIÓN Y DOSIS ÓPTIMAS DE COAGULANTE- FLOCULANTE**

Para la obtención de la combinación y dosis óptimas de coagulante-floculante de las aguas del embalse Cuchoquesera, se realizaron las pruebas de coagulación-floculación, las cuales se dividieron en dos épocas, lluvias y estiaje, dada las características particulares del agua para dichas épocas. Estas pruebas se orientaron a la remoción de sedimentos suspendidos, turbiedad, volumen de lodos y color.

### **4.3.1 Pruebas de jarras del proceso de coagulación-floculación en época de lluvias**

Esta época se caracterizó por la presencia de turbiedad y color en el agua del embalse Cuchoquesera. Para la materialización de las pruebas experimentales, primero fue necesario realizar el análisis de la información disponible sobre la calidad del agua para identificar los valores más altos de turbiedad que representan un problema durante su tratamiento en la Planta de Quicapata – Ayacucho (Figura 23). Posteriormente, se llevó a cabo la selección de los reactivos coagulantes y floculantes que fueron empleados en las pruebas de jarras. Una vez seleccionados los valores de turbiedad a evaluar, así como los reactivos coagulantes y floculantes, con sus respectivas dosis, se procedió a efectuar las pruebas de coagulación-floculación para la época de lluvias.

#### **a. Análisis cualitativo de resultados**

Se realizaron las pruebas de jarras para evaluar el desempeño de la remoción de turbiedad, color y volumen de lodos producidos en las seis combinaciones resultantes de los tres reactivos coagulantes y dos floculantes naturales seleccionados. En cada una de las seis combinaciones se representó un diseño experimental central compuesto, que se muestra en la Tabla 9, con sus respectivos valores de turbiedad inicial, dosis de coagulante y floculante natural, que se muestran en la Tabla 10, habiéndose realizado 96 experimentos totales (pruebas de jarras).

La matriz experimental de la combinación de coagulante sulfato de aluminio con el reactivo floculante goma de tara se presenta en la Tabla 13, que se muestra los valores reales no codificados de los factores de optimización: dosis de coagulante (COAG), dosis de floculante (FLOC) y valor inicial de turbiedad (TURB). También, se obtiene los resultados experimentales de las variables de respuesta turbiedad residual (rT), color residual (rC), volumen de lodos (VL), pH y partículas no sedimentables (PNS), que fueron cuantificados al final de las pruebas de jarras.

Por ejemplo, en la Tabla 14 de la matriz experimental, con las dosis de 50 mg/L de coagulante sulfato de aluminio y 55 mg/L de floculante goma de tuna, se obtuvo resultado de turbidez de 0,56 UTN, en la mayoría de las dosificaciones de coagulante y floculante resultaron por debajo de las normas de límites máximos permisibles, respecto a la variable respuesta de turbidez. En la Figura 15 se presenta el resultado de la turbidez para diversas dosificaciones.

**Tabla 13: Matriz experimental del DCC; combinación del sulfato de aluminio (coagulante) y goma de tara (floculante)**

| N°<br>Exp | Factores de diseño |                |               | Variables respuesta |                 |              |     |               |
|-----------|--------------------|----------------|---------------|---------------------|-----------------|--------------|-----|---------------|
|           | COAG<br>(mg/L)     | FLOC<br>(mg/L) | TURB<br>(UTN) | rT<br>(UTN)         | rC<br>(U Pt-Co) | VL<br>(ml/L) | pH  | PNS<br>(mg/L) |
| 1         | 50                 | 1,0            | 80            | 2,78                | 5               | 4,1          | 5,4 | 84            |
| 2         | 50                 | 3,0            | 10            | 1,30                | 9               | 3,5          | 6,8 | 290           |
| 3         | 50                 | 3,0            | 80            | 2,29                | 7               | 4,0          | 5,6 | 74            |
| 4         | 50                 | 3,0            | 80            | 2,00                | 6               | 3,9          | 5,7 | 80            |
| 5         | 19                 | 4,6            | 134           | 75,00               | 34              | 0,4          | 6,6 | 228           |
| 6         | 19                 | 1,5            | 26            | 19,30               | 34              | 0,1          | 6,8 | 246           |
| 7         | 50                 | 3,0            | 150           | 2,50                | 4               | 3,0          | 6,2 | 200           |
| 8         | 19                 | 4,6            | 26            | 19,60               | 37              | 0,5          | 6,8 | 288           |
| 9         | 50                 | 5,0            | 80            | 1,50                | 3               | 3,8          | 5,8 | 50            |
| 10        | 90                 | 3,0            | 80            | 6,92                | 23              | 3,8          | 4,6 | 68            |
| 11        | 10                 | 3,0            | 80            | 11,00               | 24              | 0,4          | 6,2 | 60            |
| 12        | 19                 | 1,5            | 134           | 74,00               | 33              | 0,5          | 6,4 | 202           |
| 13        | 81                 | 1,5            | 26            | 2,80                | 14              | 7,0          | 5,4 | 238           |
| 14        | 81                 | 4,6            | 134           | 4,20                | 5               | 4,2          | 5,1 | 196           |
| 15        | 81                 | 1,5            | 134           | 5,30                | 5               | 4,8          | 5,0 | 64            |
| 16        | 81                 | 4,6            | 26            | 2,90                | 19              | 5,9          | 5,2 | 228           |

rT: turbidez residual, rC: color residual; VL: volumen de lodos; PNS (partículas no sedimentables)

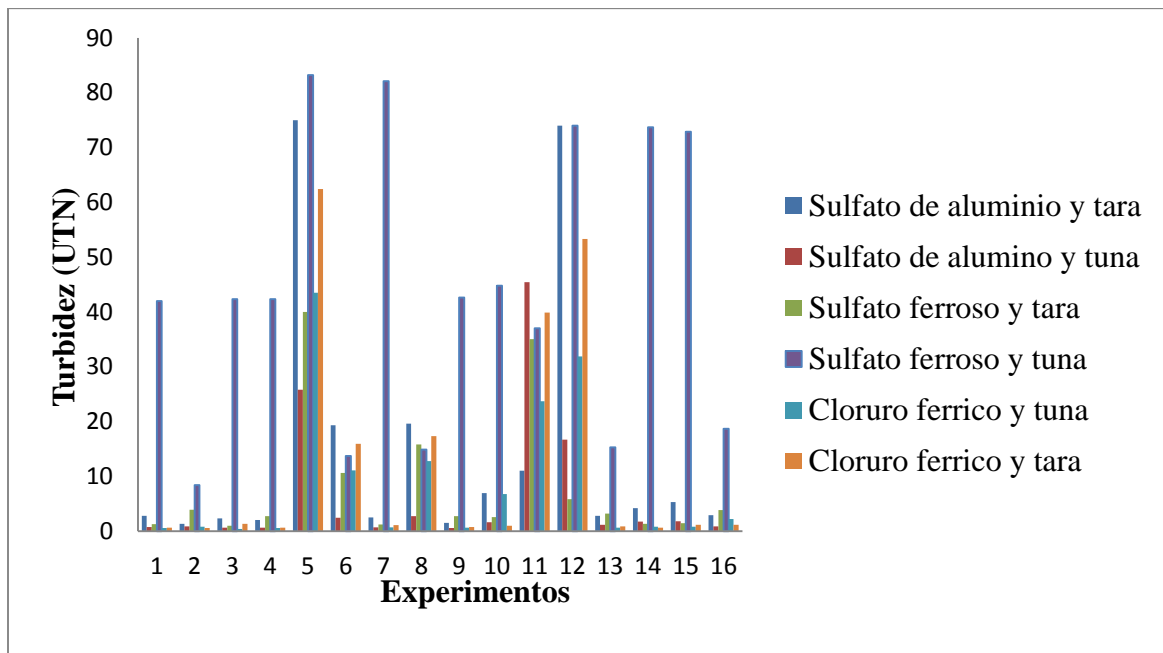
FUENTE: Informe de Laboratorio de Ingeniería Ambiental UNALM - 2018

**Tabla 14: Matriz experimental del DCC; combinación del sulfato de aluminio (coagulante) – tuna (floculante)**

| N° Exp | Factores de diseño |             |            |          | Variables respuesta |           |      |            |
|--------|--------------------|-------------|------------|----------|---------------------|-----------|------|------------|
|        | COAG (mg/L)        | FLOC (mg/L) | TURB (UTN) | rT (UTN) | rC (U Pt-Co)        | VL (ml/L) | pH   | PNS (mg/L) |
| 1      | 50                 | 15,0        | 80         | 0,75     | 5                   | 4,0       | 7,32 | 220        |
| 2      | 50                 | 35,0        | 10         | 0,83     | 6                   | 2,9       | 7,17 | 232        |
| 3      | 50                 | 35,0        | 80         | 0,65     | 4                   | 4,0       | 6,83 | 194        |
| 4      | 50                 | 35,0        | 80         | 0,60     | 6                   | 4,2       | 6,81 | 576        |
| 5      | 19                 | 50,5        | 134        | 25,80    | 62                  | 0,5       | 6,31 | 282        |
| 6      | 19                 | 19,5        | 26         | 2,46     | 10                  | 0,3       | 6,91 | 218        |
| 7      | 50                 | 35,0        | 150        | 0,66     | 4                   | 1,2       | 6,12 | 212        |
| 8      | 19                 | 50,5        | 26         | 2,70     | 13                  | 1,7       | 6,88 | 210        |
| 9      | 50                 | 55,0        | 80         | 0,56     | 4                   | 4,0       | 6,76 | 226        |
| 10     | 90                 | 35,0        | 80         | 1,59     | 9                   | 3,6       | 5,21 | 280        |
| 11     | 10                 | 35,0        | 80         | 45,40    | 21                  | 0,4       | 5,90 | 240        |
| 12     | 19                 | 19,5        | 134        | 16,70    | 32                  | 0,3       | 6,15 | 216        |
| 13     | 81                 | 19,5        | 26         | 1,17     | 54                  | 4,3       | 5,84 | 210        |
| 14     | 81                 | 50,5        | 134        | 1,73     | 5                   | 1,3       | 5,91 | 164        |
| 15     | 81                 | 19,5        | 134        | 1,81     | 5                   | 1,8       | 5,48 | 428        |
| 16     | 81                 | 50,5        | 26         | 0,87     | 4                   | 4,9       | 5,44 | 166        |

rT: turbidez residual, rC: color residual; VL: volumen de lodos; PNS (partículas no sedimentables)

FUENTE: Informe de Laboratorio de Ingeniería Ambiental UNALM - 2018



**Figura 15: Turbidez de agua para diferentes dosificaciones de coagulantes y floculantes**

**Tabla 15: Matriz experimental del DCC; combinación del sulfato ferroso (coagulante) – goma de tara (floculante)**

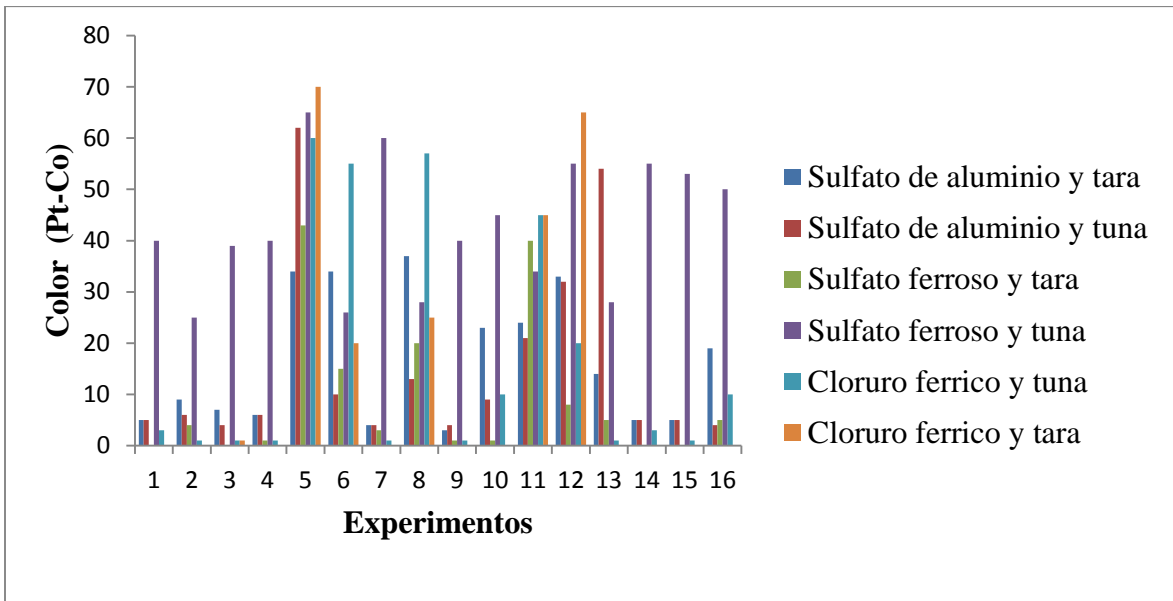
| N°<br>Exp | Factores de diseño |                |               | Variables respuesta |                 |              |      |               |
|-----------|--------------------|----------------|---------------|---------------------|-----------------|--------------|------|---------------|
|           | COAG<br>(mg/L)     | FLOC<br>(mg/L) | TURB<br>(UTN) | rT<br>(UTN)         | rC<br>(U Pt-Co) | VL<br>(ml/L) | pH   | PNS<br>(mg/L) |
| 1         | 55                 | 1              | 80            | 1,29                | 0               | 2,5          | 5,10 | 28            |
| 2         | 55                 | 3              | 10            | 3,90                | 4               | 0,0          | 7,41 | 340           |
| 3         | 55                 | 3              | 80            | 1,00                | 0               | 3,0          | 4,90 | 106           |
| 4         | 55                 | 3              | 80            | 2,75                | 1               | 3,5          | 5,20 | 550           |
| 5         | 20,1               | 4,6            | 134           | 40,00               | 43              | 0,6          | 7,70 | 48            |
| 6         | 20,1               | 1,5            | 26            | 10,60               | 15              | 0,1          | 7,30 | 286           |
| 7         | 55                 | 3              | 150           | 1,18                | 3               | 3,1          | 7,30 | 12            |
| 8         | 20,1               | 4,6            | 26            | 15,80               | 20              | 0,0          | 7,30 | 296           |
| 9         | 55                 | 5              | 80            | 2,75                | 1               | 3,0          | 5,00 | 70            |
| 10        | 100                | 3              | 80            | 2,57                | 1               | 4,0          | 4,20 | 28            |
| 11        | 10                 | 3              | 80            | 35,00               | 40              | 0,4          | 5,96 | 66            |
| 12        | 20,1               | 1,5            | 134           | 5,81                | 8               | 1,7          | 7,16 | 10            |
| 13        | 89,9               | 1,5            | 26            | 3,22                | 5               | 2,0          | 6,30 | 262           |
| 14        | 89,9               | 4,6            | 134           | 1,33                | 0               | 3,0          | 5,50 | 64            |
| 15        | 89,9               | 1,5            | 134           | 1,46                | 0               | 3,8          | 5,50 | 80            |
| 16        | 89,9               | 4,6            | 26            | 3,85                | 5               | 2,1          | 6,10 | 286           |

rT: turbidez residual; rC: color residual; VL: volumen de lodos; PNS (partículas no sedimentables).

FUENTE: Informe de Laboratorio de Ingeniería Ambiental UNALM - 2018

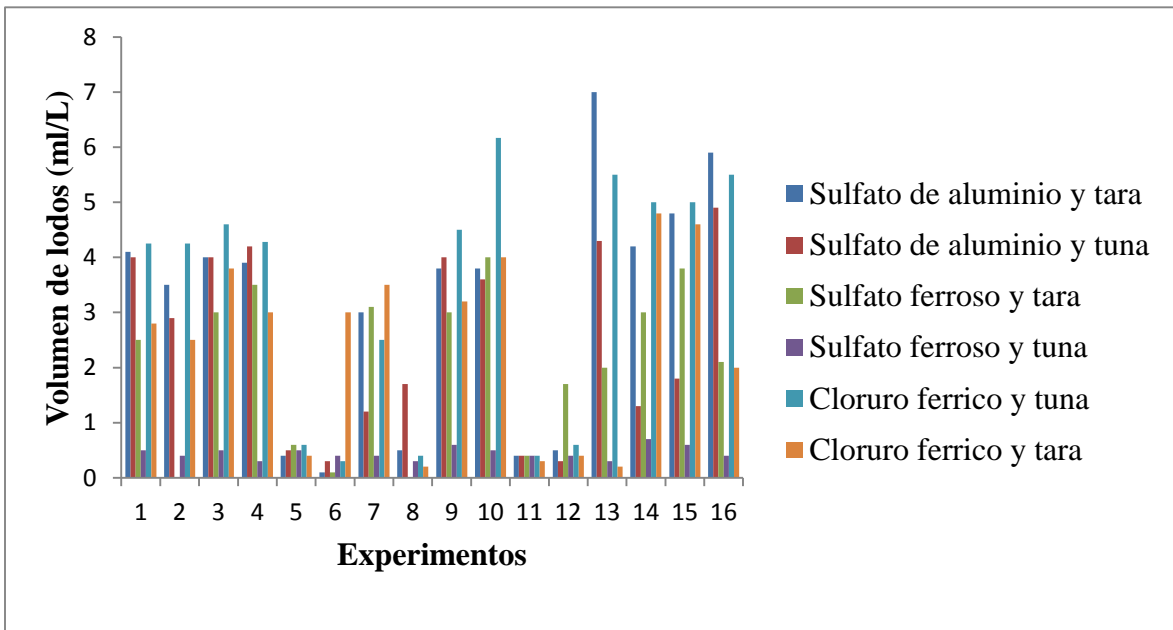
Asimismo, en la Tabla 15 de la matriz experimental con las dosis de 55 mg/L de coagulante sulfato ferroso y de 1 mg/l de floculante goma de tara, se obtuvo como resultado el color de 0,0 (U Pt-Co) en la mayoría de las dosificaciones de coagulante y floculante, valor por debajo de las normas de límites máximos permisibles, referidos respecto a la variable respuesta de color; presentándose para diversas dosificaciones en la Figura 16.

Respecto a los valores de la turbidez para las dosificaciones de coagulante sulfato ferroso y floculante goma de tara reportaron valores dentro del límite máximo permisible estipulado por la Organización Mundial de Salud y Reglamento de la Calidad del Agua para consumo humano del DS N° 031-2010-SA es de 5 UTN (unidades de turbidez nefelométricas), siendo el agua apto para el consumo humano por la escasa turbiedad que presenta el agua del embalse; a excepción de los tratamientos 5, 6, 8, 11 y 12 que excedieron los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad ambiental.



**Figura 16: Color del agua para diferentes dosificaciones de coagulantes y floculantes**

En la Tabla 16 de la matriz experimental, se observa que con las dosis de 55 mg/L de coagulante sulfato ferroso y 35 mg/L de floculante goma de tuna, se obtuvo un resultado aceptable de volumen de lodos de 0,3 mg/L; mientras que en la mayoría de las dosificaciones de coagulante y floculante resultaron presentes los lodos, superando los límites máximos permisibles; estos resultados de volumen de lodos para diversas dosificaciones se muestra en la Figura 17.



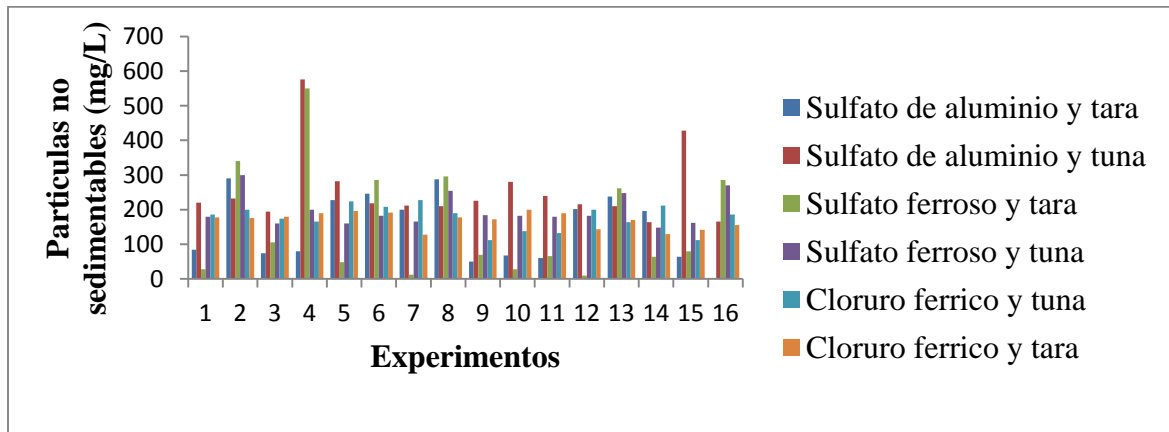
**Figura 17: Volumen de lodos en el agua para diferentes dosificaciones de coagulantes**

**Tabla 16: Matriz experimental del DCC; combinación del sulfato ferroso (coagulante) – tuna (floculante)**

| N° Exp | Factores de diseño |             |            |          | Variables respuesta |           |      |            |
|--------|--------------------|-------------|------------|----------|---------------------|-----------|------|------------|
|        | COAG (mg/L)        | FLOC (mg/L) | TURB (UTN) | rT (UTN) | rC (U Pt-Co)        | VL (ml/L) | pH   | PNS (mg/L) |
| 1      | 55,0               | 15,0        | 80         | 42,0     | 40                  | 0,5       | 7,17 | 180        |
| 2      | 55,0               | 35,0        | 10         | 8,4      | 25                  | 0,4       | 6,78 | 300        |
| 3      | 55,0               | 35,0        | 80         | 42,3     | 39                  | 0,5       | 6,82 | 160        |
| 4      | 55,0               | 35,0        | 80         | 42,3     | 40                  | 0,3       | 6,77 | 200        |
| 5      | 20,1               | 50,5        | 134        | 83,2     | 65                  | 0,5       | 7,13 | 160        |
| 6      | 20,1               | 19,5        | 26         | 13,7     | 26                  | 0,4       | 6,88 | 182        |
| 7      | 55,0               | 35,0        | 150        | 82,1     | 60                  | 0,4       | 6,80 | 166        |
| 8      | 20,1               | 50,5        | 26         | 14,9     | 28                  | 0,3       | 6,90 | 254        |
| 9      | 55,0               | 55,0        | 80         | 42,6     | 40                  | 0,6       | 6,74 | 184        |
| 10     | 100,0              | 35,0        | 80         | 44,8     | 45                  | 0,5       | 6,56 | 182        |
| 11     | 10,0               | 35,0        | 80         | 37,0     | 34                  | 0,4       | 6,80 | 180        |
| 12     | 20,1               | 19,5        | 134        | 74,0     | 55                  | 0,4       | 6,85 | 182        |
| 13     | 89,9               | 19,5        | 26         | 15,3     | 28                  | 0,3       | 6,87 | 248        |
| 14     | 89,9               | 50,5        | 134        | 73,7     | 55                  | 0,7       | 6,62 | 148        |
| 15     | 89,9               | 19,5        | 134        | 72,9     | 53                  | 0,6       | 6,48 | 162        |
| 16     | 89,9               | 50,5        | 26         | 18,7     | 50                  | 0,4       | 6,84 | 270        |

FUENTE: Informe de Laboratorio de Ingeniería Ambiental UNALM - 2018

En la Tabla 17 de la matriz experimental con las dosis de 18 mg/L de coagulante cloruro férrico y 55 mg/L de floculante goma de tuna, se obtuvo partículas sedimentables de 112 mg/L; sin embargo, con la combinación de sulfato ferroso y harina de tara se obtuvo como resultado un valor de 10 mg/L; en la mayoría de las dosificaciones de coagulante y floculante resultaron presente las partículas no sedimentables (PNS), que no superan los límites máximos permisibles, referidos respecto a la variable respuesta de (PNS). En la Figura 18 se presenta el resultado de las partículas no sedimentables para diversas dosificaciones.



**Figura 18: Partículas no sedimentadas en agua para diferentes dosificaciones**

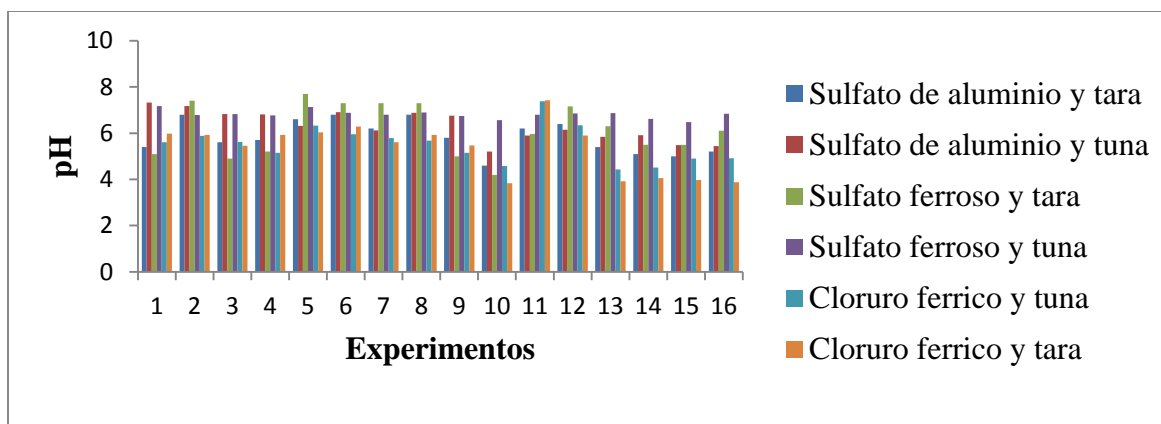


**Tabla 17: Matriz experimental del DCC; combinación del cloruro férrico (coagulante) – tuna (floculante)**

| N° Exp | Factores de diseño |             |            |          | Variables respuesta |           |      |            |
|--------|--------------------|-------------|------------|----------|---------------------|-----------|------|------------|
|        | COAG (mg/L)        | FLOC (mg/L) | TURB (UTN) | rT (UTN) | rC (U Pt-Co)        | VL (ml/L) | pH   | PNS (mg/L) |
| 1      | 18,0               | 15,0        | 80         | 0,54     | 3                   | 4,25      | 5,60 | 186        |
| 2      | 18,0               | 35,0        | 10         | 0,80     | 1                   | 4,25      | 5,88 | 200        |
| 3      | 18,0               | 35,0        | 80         | 0,38     | 1                   | 4,60      | 5,62 | 174        |
| 4      | 18,0               | 35,0        | 80         | 0,56     | 1                   | 4,28      | 5,15 | 166        |
| 5      | 8,7                | 50,5        | 134        | 43,50    | 60                  | 0,60      | 6,33 | 224        |
| 6      | 8,7                | 19,5        | 26         | 11,10    | 55                  | 0,30      | 5,95 | 208        |
| 7      | 18,0               | 35,0        | 150        | 0,68     | 1                   | 2,50      | 5,78 | 228        |
| 8      | 8,7                | 50,5        | 26         | 12,80    | 57                  | 0,40      | 5,67 | 190        |
| 9      | 18,0               | 55,0        | 80         | 0,60     | 1                   | 4,50      | 5,15 | 112        |
| 10     | 30,0               | 35,0        | 80         | 6,74     | 10                  | 6,17      | 4,58 | 138        |
| 11     | 6,0                | 35,0        | 80         | 23,70    | 45                  | 0,40      | 7,38 | 132        |
| 12     | 8,7                | 19,5        | 134        | 31,90    | 20                  | 0,60      | 6,34 | 200        |
| 13     | 27,3               | 19,5        | 26         | 0,60     | 1                   | 5,50      | 4,43 | 164        |
| 14     | 27,3               | 50,5        | 134        | 0,80     | 3                   | 5,00      | 4,51 | 212        |
| 15     | 27,3               | 19,5        | 134        | 0,82     | 1                   | 5,00      | 4,90 | 112        |
| 16     | 27,3               | 50,5        | 26         | 2,17     | 10                  | 5,50      | 4,92 | 186        |

FUENTE: Informe de Laboratorio de Ingeniería Ambiental UNALM - 2018

En la Tabla 18 de la matriz experimental del trabajo se reporta, que el pH para coagulante cloruro férrico y floculante goma de tara varia de 3,83 a 7,42; mientras que en la combinación de sulfato ferroso y goma de tuna se obtuvo como resultado en el rango de 6,48 a 7,38, que podría considerarse aceptable; en la mayoría de las dosificaciones de coagulante y floculante, el pH es ácido con valores de 3,83 inclusive. En consecuencia, el pH no se ubica dentro de los límites máximos permisibles. En la Figura 19 se presenta el resultado de pH para diversas dosificaciones.



**Figura 19: pH del agua para diferentes dosificaciones de coagulantes y floculantes**

**Tabla 18: Matriz experimental del DCC; combinación del cloruro férrico (coagulante) – goma de tara (floculante)**

| N° Exp | Factores de diseño |             |            | Variables respuesta |              |           |      |            |
|--------|--------------------|-------------|------------|---------------------|--------------|-----------|------|------------|
|        | COAG (mg/L)        | FLOC (mg/L) | TURB (UTN) | rT (UTN)            | rC (U Pt-Co) | VL (ml/L) | pH   | PNS (mg/L) |
| 1      | 18,0               | 1,0         | 80         | 0,64                | 0            | 2,8       | 5,98 | 178        |
| 2      | 18,0               | 3,0         | 10         | 0,59                | 0            | 2,5       | 5,93 | 176        |
| 3      | 18,0               | 3,0         | 80         | 1,33                | 1            | 3,8       | 5,45 | 180        |
| 4      | 18,0               | 3,0         | 80         | 0,60                | 0            | 3,0       | 5,92 | 190        |
| 5      | 8,7                | 4,6         | 134        | 62,40               | 70           | 0,4       | 6,04 | 196        |
| 6      | 8,7                | 1,5         | 26         | 15,90               | 20           | 3,0       | 6,29 | 192        |
| 7      | 18,0               | 3,0         | 150        | 1,11                | 0            | 3,5       | 5,61 | 128        |
| 8      | 8,7                | 4,6         | 26         | 17,30               | 25           | 0,2       | 5,92 | 178        |
| 9      | 18,0               | 5,0         | 80         | 0,75                | 0            | 3,2       | 5,47 | 172        |
| 10     | 30,0               | 3,0         | 80         | 0,96                | 0            | 4,0       | 3,83 | 200        |
| 11     | 6,0                | 3,0         | 80         | 39,90               | 45           | 0,3       | 7,42 | 190        |
| 12     | 8,7                | 1,5         | 134        | 53,30               | 65           | 0,4       | 5,90 | 144        |
| 13     | 27,3               | 1,5         | 26         | 0,85                | 0            | 0,2       | 3,91 | 170        |
| 14     | 27,3               | 4,6         | 134        | 0,65                | 0            | 4,8       | 4,06 | 130        |
| 15     | 27,3               | 1,5         | 134        | 1,12                | 0            | 4,6       | 3,97 | 142        |
| 16     | 27,3               | 4,6         | 26         | 1,16                | 0            | 2,0       | 3,87 | 156        |

FUENTE: Informe de Laboratorio de Ingeniería Ambiental UNALM - 2018

Los valores de duración y velocidades de agitación de las etapas de coagulación y floculación fueron los mismos para todas las pruebas de jarras cuyos resultados se presentan en la Tabla 19.

**Tabla 19: Tiempos y velocidades de agitación en las pruebas de coagulación-floculación**

| Etapa         | Tiempo (min'seg'') | Velocidad (rpm) | Descripción           |
|---------------|--------------------|-----------------|-----------------------|
| Coagulación   | 10''               | 285             | Adición de coagulante |
| Floculación   | 30'                | 35              | Adición de floculante |
| Sedimentación | 10'                | 0               | -                     |

En la Tabla 20 se reporta el resumen de las seis combinaciones evaluadas del número de matrices experimentales realizadas con intervalos de valores resultantes para las variables

de respuesta rT, rC, VL, pH, PNS; observándose que en la mayoría de los casos el tipo de floculante mostró una influencia importante en los resultados de disminución de turbidez y color; sin embargo, para los lodos producidos, no se obtuvo un buen desempeño para los tres coagulantes evaluados, en comparación con los otros dos floculantes, presentando valores bajos y menor variación en el volumen de lodos. Las combinaciones de sulfato de aluminio mostraron menor variación en la turbiedad residual y en el color; sin embargo, el volumen de lodos producidos es menor para estas combinaciones, que a su vez resultaron con valores menor de pH.

El sulfato de aluminio en combinación con un floculante natural permitió remover adecuadamente la turbiedad y el color, lo cual se atribuye a que los iones aluminio ( $Al^{3+}$ ) liberados son hidrolizados para formar complejos de hidróxidos insolubles de carga positiva, que permite desestabilizar las partículas suspendidas mediante la neutralización de cargas; de igual modo, ocurre con la adsorción de materia orgánica sobre la superficie de los hidróxidos, siendo el principal mecanismo la neutralización de cargas (Parsons y Jefferson 2006). Con la adición del floculante natural se favorece la colisión de partículas al fomentar la formación de puentes o uniones entre las partículas desestabilizadas, asimismo la precipitación de los hidróxidos formados y unidos en puentes permite también una remoción de partículas por el mecanismo de barrido (Chang *et al.* 2005).

Con respecto a los lodos producidos, el sulfato de aluminio presentó la más alta producción, como ha sido reportado previamente (Bolto *et al.* 2001), dicha producción se atribuye a que en este estudio se manejaron dosis altas de sal metálica (15 - 150 mg/L) y, principalmente, porque los flóculos formados por sales metálicas poseen baja velocidad de sedimentación, siendo poco estables y de menor tamaño que aquellos producidos por polímeros orgánicos (Turchiulli y Fargues 2004). Otra desventaja del uso del sulfato de aluminio es que los residuales de iones sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) ocasionan que el agua sea corrosiva por la subsecuente formación de  $H_2SO_4$  (Matilainen *et al.* 2010), que se demuestra por los bajos valores de pH obtenidos (Tabla 19). Se ha reportado hasta el 97 por ciento de remoción de turbiedad empleando sulfato de aluminio en dosis de 5-100 mg/L pero con un ajuste de pH (Matilainen *et al.* 2010).

**Tabla 20: Resultados experimentales de las variables de respuesta de las combinaciones coagulante-floculante**

| COAG        | FLOC    | rT<br>(UTN) | rC<br>(U Pt-Co) | VL<br>(ml/L) | pH          | PNS<br>(mg/L) |
|-------------|---------|-------------|-----------------|--------------|-------------|---------------|
| S. aluminio | G. tara | 1,30 – 75,0 | 3,0 - 37        | 0,1 – 7,0    | 4,6 – 6,8   | 50 - 290      |
| S. aluminio | P. tuna | 0,56 – 45,4 | 4,0 - 62        | 0,3 – 4,9    | 5,21 – 7,32 | 164 - 576     |
| S. ferroso  | G. tara | 1,00 – 40,0 | 0,0 - 43        | 0,0 – 4,0    | 4,20 – 7,7  | 10 - 550      |
| S. ferroso  | P. tuna | 8,40 – 83,2 | 25,0 - 65       | 0,3 – 0,7    | 6,48 - 7,17 | 148 - 300     |
| C. férrico  | P. tuna | 0,38 – 43,5 | 1,0 - 60        | 0,3 – 6,17   | 4,43 – 7,38 | 112 - 228     |
| C. férrico  | G. tara | 0,59 – 62,4 | 0,0 - 70        | 0,2 – 4,8    | 3,83 – 7,42 | 128 - 200     |

#### **b. Análisis estadístico de los datos experimentales**

Con los resultados experimentales obtenidos, se procedió a realizar el análisis estadístico (programa informático R) para determinar los factores significativos de los tres factores evaluados (dosis de coagulante, dosis de floculante y valor inicial de turbiedad) que inciden sobre las variables de respuesta (rT, rC y VL), así como se obtuvo los modelos matemáticos que describen el comportamiento de las variables respuesta, y se evaluó estos modelos mediante las pruebas estadísticas de análisis de varianza (ANOVA), coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y falta de ajuste (Gutiérrez y De La Vara 2008). Finalmente, con dichos modelos se calcularon las dosis óptimas de coagulante y floculante para la máxima remoción de turbiedad y color.

En la Tabla 22 se muestra las seis combinaciones y las tres variables de respuesta, habiéndose desarrollado nueve modelos matemáticos de regresión (ecuaciones 10 al 18) y los valores de las pruebas de  $R^2$  y de Falta-de-ajuste se muestran en la Tabla 22. El valor de  $R^2$  señala la variación en la variable de respuesta atribuida a los factores de optimización. Siendo mejor conforme el valor se acerca a la unidad. La prueba de *Falta de ajuste* debe poseer un valor mayor a 0,05, con lo cual indica si el modelo matemático es adecuado para describir el comportamiento de la variable de respuesta (Rigas *et al.* 2007).

En la Tabla 21 se reporta los resultados de los valores de las pruebas de  $R^2$  y de Falta de ajuste.

**Tabla 21: Valores de coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y falta de ajuste para las variables de respuesta de las combinaciones de coagulante-floculante**

| Coagulante          | Floculante    | rT     |                 | rC     |                 | VL     |                 |
|---------------------|---------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
|                     |               | $R^2$  | Falta de ajuste | $R^2$  | Falta de ajuste | $R^2$  | Falta de ajuste |
| Sulfato de aluminio | Goma de tara  | 0,7533 | 0,7402          | 0,8327 | 0,9458          | 0,8703 | 0,1071          |
| Sulfato de aluminio | Polvo de tuna | 0,7715 | 0,7813          | 0,6031 | 0,00498         | 0,6754 | 0,000024        |
| Sulfato ferroso     | Goma de tara  | 0,7576 | 0,1658          | 0,8041 | 0,1572          | 0,7654 | 0,05261         |
| Sulfato ferroso     | Polvo de tuna | 0,9921 | 0,7178          | 0,9023 | 0,646           | 0,7034 | 0,7722          |
| Cloruro férrico     | Polvo de tuna | 0,9102 | 0,7636          | 0,8722 | 0,4594          | 0,8963 | 0,003012        |
| Cloruro férrico     | Goma de tara  | 0,9409 | 0,7615          | 0,9397 | 0,7572          | 0,7969 | 0,0875          |

Los modelos matemáticos de las combinaciones de sulfato de aluminio-polvo de tuna y cloruro férrico-polvo de tuna fueron rechazadas porque no pasaron la prueba de falta de ajuste tienen valores menores a 0,05, lo que indicaría que el modelo matemático no es adecuado para describir el comportamiento de la variable respuesta. También, fue rechazado el modelo matemático de la combinación de sulfato ferroso-polvo de tuna porque no pasaron las pruebas de  $R^2 > 0,75$ , lo que permite señalar que la variación en la variable respuesta no es atribuible a los factores de optimización.

El sulfato de aluminio - goma de tara, sulfato ferroso-goma de tara, y cloruro férrico-goma de tara, presentaron valores adecuados de  $R^2 (> 0,75)$  para todas las variables respuestas (rT, rC y vL); de igual modo, estas combinaciones arrojan valores mayores a 0,05 para las tres variables de respuesta en la prueba de Falta de ajuste; por lo tanto, son adecuadas para proseguir con la optimización.

Posteriormente se procede con el análisis de varianza para determinar los factores de diseño e interacciones entre factores que fueron significativos en el proceso analizado, que se reporta en la Tabla 22.

Con el análisis de varianza se determinó los factores de diseño y las interacciones entre factores que fueron significativos para el proceso de coagulación-floculación para tratar el agua del embalse Cuchoquesera durante la época de lluvias.

**Tabla 22: ANOVA para las combinaciones de coagulante-floculante**

| Combinaciones                      | Modelos     | Términos Significativos  |
|------------------------------------|-------------|--|
| Sulfato de aluminio - goma de tara | rT = Ec. 10 | COAG(0,00761)<br>COAG*TURB(0,03784)  |
|                                    | rC = Ec. 11 | COAG(0,00206)<br>COAG <sup>2</sup> (0,00114)   |
|                                    | vL = Ec. 12 | COAG(0,00011)  |
| Sulfato ferroso - goma de tara     | rT = Ec. 13 | COAG(0,00298)<br>COAG <sup>2</sup> (0,02083)   |
|                                    | rC = Ec. 14 | COAG(0,00106)<br>COAG <sup>2</sup> (0,00991)   |
|                                    | vL = Ec. 15 | COAG(0,00319)<br>TURB(0,02269)   |
| Cloruro férrico- goma de tara      | rT = Ec. 16 | COAG(0,0000907)<br>TURB(0,004302 )<br>COAG <sup>2</sup> (0,000533 )<br>COAG*TURB(0,002668) |
|                                    | rC = Ec. 17 | COAG(0,0000768)<br>TURB(0,007364)<br>COAG <sup>2</sup> (0,000563)<br>COAG*TURB(0,002668)   |
|                                    | vL = Ec. 18 | COAG(0,00656 )<br>COAG*TURB(0,00988)   |

En la Tabla 22 se muestran los términos significativos (*valor-p* < 0,05) de los modelos matemáticos de las tres variables de respuesta para las combinaciones coagulante-floculante que fueron seleccionadas. La dosis de coagulante (COAG) fue significativa para las tres combinaciones en las tres variables de respuesta, el término COAG<sup>2</sup>, también resultó significativo para el color residual (rC) para las tres combinaciones coagulante-floculante y significativo para la turbiedad residual (rT) de las combinaciones. La turbiedad inicial (TURB) fue significativa para la variable de respuesta del volumen de lodos (VL) para las tres combinaciones coagulante-floculante, así como parte de las interacciones con la dosis de coagulante (COAG\*TURB) de las combinaciones estudiadas, para la turbiedad residual y el color residual. De igual modo, TURB fue significativa en la interacción con la dosis de floculante (FLOC\*TURB) para rT y rC en las tres combinaciones del coagulante.

Ecuaciones:

**Sulfato de aluminio- goma de tara**

Ecuación 10:

$$rT = 28,25 - 1,15COAG - 0,004FLOC + 0,15TURB + 0,013COAG^2 \\ - 0,007(COAG * TURB) + 0,003TURB^2$$

Ecuación 11:

$$rC = 57,54 - 1,55COAG + 0,39FLOC - 0,15TURB + 0,014COAG^2 \\ - 0,001(COAG * TURB) + 0,001TURB^2$$

Ecuación 12:

$$vL = -0,859 - 0,11COAG - 0,41FLOC + 0,008TURB + 0,092FLOC^2 \\ - 0,004(COAG * FLOC) - 0,0003(COAG * TURB) - 0,00002(FLOC \\ * TURB)$$

**Sulfato de ferroso- goma de tara**

Ecuación 13:

$$rT = 22,53 - 0,96COAG + 2,37FLOC + 0,13TURB + 0,007COAG^2 \\ - 0,001(COAG * TURB) - 0,0002TURB^2$$

Ecuación 14:

$$rC = 32,07 - 1,17COAG + 2,34FLOC - 0,06TURB + 0,009COAG^2 \\ - 0,001(COAG * TURB) + 0,0002TURB^2$$

Ecuación 15:

$$vL = -1,552 + 0,027COAG + 0,047FLOC + 0,0215TURB - 0,062FLOC^2 \\ - 0,001(COAG * FLOC) + 0,0003(COAG * TURB) - 0,0002(FLOC \\ * TURB)$$

## Cloruro férrico- goma de tara

Ecuación 16:

$$rT = 51,56 - 6,25COAG + 0,62FLOC + 0,36TURB + 0,17COAG^2 - 0,02(COAG * TURB) - 0,0009TURB^2$$

Ecuación 17:

$$rC = 66,62 - 7,63COAG + 0,60FLOC + 0,35TURB + 0,20COAG^2 - 0,02(COAG * TURB) + 0,0012TURB^2$$

Ecuación 18:

$$vL = 4,67 - 0,199COAG - 0,065FLOC - 0,039TURB - 0,139FLOC^2 + 0,041(COAG * FLOC) + 0,0024(COAG * TURB) + 0,0018(FLOC * TURB)$$

Donde:

rT: turbiedad residual (UTN)

rC: color residual (U Pt-Co)

VL: volumen de lodos (ml/L)

COAG: dosis codificada (de -1,29 a 1,29) de coagulante

FLOC: dosis codificada (de -1,29 a 1,29) de floculante

TURB: turbiedad inicial codificada (de -1,29 a 1,29)

### c. Optimización de las dosis de reactivos para el proceso de coagulación-floculación de agua

Con los modelos estadísticos obtenidos (Ecuaciones 10-18) de las variables de respuesta para las tres combinaciones de coagulante-floculante, se procedió a calcular los valores óptimos de dosis de coagulante (COAG) y dosis de floculante (FLOC) para tratar los máximos niveles de turbiedad presentados en el Anexo 2, estos valores se seleccionaron dado que para la planta de tratamiento de Quicapata representa un mayor uso de coagulante y una fuerte producción de lodos. Asimismo, se incluyeron los valores de las variables de respuesta obtenidos bajo las condiciones óptimas.

En la Tabla 23 se muestra los resultados de los valores óptimos de dosis para las combinaciones de coagulantes (sulfato de aluminio y sulfato ferroso) y floculante goma de tara para tratar el agua del embalse Cuchoquesera.



**Tabla 23: Valores óptimos de dosis para las combinaciones de coagulante-floculante para tratar agua del embalse Cuchoquesera**

| Parámetros                                | Sulfato de aluminio | Sulfato ferroso |
|---|---------------------|-----------------|
| Dosis de coagulante (mg/L)                | 27,9                | 68,6            |
| Dosis de floculante (goma de tara) (mg/L) | 3,0                 | 1,8             |
| rT (UTN)                                  | 1,7                 | 0,2             |
| rC (U Pt-Co)                              | 3,2                 | 10,3            |

#### 4.3.2 Concentraciones de clorofila-a en la época de estiaje

Para la época de estiaje se evaluaron el fitoplancton (algas), cuantificados como clorofila-a (por ser el pigmento fotosintético presente en todos los organismos fitoplanctónicos) (Gregor y Maršálek 2004). En la Tabla 24 se reporta los resultados experimentales de la presencia de clorofila-a en las aguas del embalse Cuchoquesera, no habiéndose cuantificado y/o no detectado el contenido de clorofila-a con un límite de concentración menor de 0,1 (<0,1) en los cuatro muestreos (primer y segundo) de las aguas del embalse Cuchoquesera, no existiendo el florecimiento temporal de algas, que previamente se realizó el análisis químico en el laboratorio de ensayo acreditado International Inassa Envirolab.

**Tabla 24: Resultados experimentales de la presencia de la Clorofila-a**

| Numero de muestra | Clorofila-a (µg/L) |                  |
|-------------------|--------------------|------------------|
|                   | Primer muestreo    | Segundo muestreo |
| PM1               | <0,1               | <0,1             |
| PM2               | <0,1               | <0,1             |
| PM3               | <0,1               | <0,1             |
| PM4               | <0,1               | <0,1             |

FUENTE: Informe de Laboratorio NSF International Inassa Envirolab - 2018

#### **4.4 ANÁLISIS DEL COSTO DE TRATAMIENTO DE LAS COMBINACIONES DE COAGULANTES Y FLOCULANTES**

Para cuantificar el costo-beneficio del uso de la goma de tara y polvo de tuna como ayudante de floculación frente al tratamiento convencional, se realizó el análisis económico preliminar que ha permitido conocer el costo de tratamiento de una determinada cantidad de agua con los productos mencionados.

El análisis se realizó con los precios de mercado en dólares del sulfato de aluminio, sulfato ferroso, cloruro férrico, goma de tara y polvo de tuna proporcionada por las empresas distribuidoras en el Perú.

También mencionar que el ahorro en costos con la reducción de sulfato de aluminio debido al bajo costo del mismo, no es suficiente para compensar lo que se gasta en la goma de tara y polvo de tuna; sin embargo, se podría verificar realizando una comparación con un polímero sintético y ver la factibilidad económica de este producto.

Hay que tener en cuenta que el uso de estos productos naturales es inocuo para el ser humano y con ciertas ventajas desde el punto de vista de la salud; los precios en el mercado de la goma de tara en promedio son de \$ 7,00 dólares el kilogramo, variando el precio de acuerdo a la demanda, ya que la goma de tara se exporta al mercado internacional; mientras que el precio promedio del sulfato de aluminio es de \$ 2,00 dólares por kilogramo.

##### **4.4.1 Evaluación de la factibilidad técnica y económica**

###### **a. Matriz de decisión multicriterio (MDM)**

La elaboración de una matriz de decisión multicriterio (MDM) ayuda en la toma de decisiones en un proyecto, en este caso, en la selección de los reactivos que mejor desempeñaron y presentaron desde el punto de vista técnico y económico.

Al haberse identificado todos los criterios considerados en una MDM, se asignó a cada uno un peso ponderado, que define el nivel de importancia de cada criterio expresado en porcentaje. La suma total de los pesos ponderados de todos los criterios es igual al 100 por ciento, habiéndose asignado un peso ponderado de 50 por ciento al criterio técnico y 50 por ciento al económico.

La evaluación del desempeño de los reactivos mediante la MDM se realizó utilizando la siguiente nomenclatura:

**i:** Aspecto evaluado. Por ejemplo, turbiedad final, color final, partículas no sedimentables, volumen de lodos, etc.

**A<sub>i</sub>:** Calificación asignada para el aspecto i, la cual fue de 0 a 5

**n<sub>i</sub>:** Número total de aspectos evaluados en cada criterio

**A<sub>max</sub> :** Calificación máxima posible, en este caso es igual a 5

**B:** Producto aritmético de n<sub>i</sub> y A<sub>max</sub>

**C<sub>pi</sub>:** Calificación ponderada para el aspecto i

**D:** Calificación final para la combinación de reactivos evaluada

Tomando en cuenta la evaluación fijada, para cada pareja de coagulante y floculante, se calificó el desempeño en cada uno de los aspectos técnico y económico, asignando en cada uno de ellos una calificación A<sub>i</sub>. La calificación de cinco se otorgó cuando las combinaciones de reactivos lograban conseguir satisfactoriamente el valor deseado de algún aspecto, y esta calificación se iba reduciendo mientras más se alejaban de ese objetivo, hasta alcanzar el valor de cero.

Por otro lado, se obtuvo el valor de B y cada calificación A<sub>i</sub> se dividió entre el primero. Estos cocientes A<sub>i</sub>/B se multiplicaron a su vez por 50 (que es el peso ponderado correspondiente al criterio técnico o económico según el caso), obteniendo de esta manera las calificaciones ponderadas “C<sub>pi</sub>”. Finalmente, se sumaron las calificaciones ponderadas y se obtuvo para cada combinación de reactivos, las evaluaciones finales “D”. A continuación, se presenta la secuencia de cálculo para obtener la calificación final:

$$A_i \in [0,5] \dots\dots\dots \text{(Ecuación 19)}$$

$$B = \sum_{i=1}^n n_i * A_{max} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 20)}$$

$$C_{pi} = (A_i / B) * 50 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 21)}$$

$$D = \sum_{i=1}^n C_{pi} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 22)}$$

**b. Aspectos técnicos**

Los aspectos técnicos seleccionados para elaborar la MDM en el estudio fueron los valores residuales de los parámetros fisicoquímicos que se midieron en las pruebas de jarras en el agua tratada.

Los aspectos técnicos se presentan a continuación:

- Turbiedad final
- Color aparente final
- Partículas no sedimentables
- Volumen de lodos
- Valor final de pH

**Turbiedad, color y volumen de lodos.** Estos tres aspectos presentan el mismo intervalo de calificación como se muestra a continuación:

- 5 = Óptimo (0,0-2,5)
- 4 = Muy bueno (2,5-5,0)
- 3 = Bueno (5,0)
- 2 = Regular (5,0-7,5)
- 1 = Suficiente (7,5-10,0)
- 0 = Insuficiente (>10,0)

**Partículas no sedimentables.** De acuerdo a los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental aprobado por Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable, pueden ser las partículas no sedimentables hasta 1 000 mg/L, habiéndose calificado de la siguiente manera:

- 5 = Óptimo (0-200)
- 4 = Muy bueno (200-400)
- 3 = Bueno (400-600)
- 2 = Regular (600-800)
- 1 = Suficiente (800-1000)
- 0 = Insuficiente (>1000)

**Valor de pH.** Este parámetro de calidad del agua debe obligatoriamente tener un valor en el intervalo de 6,5 – 8,5, de acuerdo a la norma oficial peruana para agua de consumo humano LMP – DS N° 031-2010-SA, siendo la calificación la siguiente:

- 5 = Excelente (pH entre 6,5 y 8,5)
- 0 = Cualquier otro valor

En la Tabla 25 se muestra la calificación obtenida en la evaluación técnica de las combinaciones de reactivos utilizadas durante las pruebas experimentales, presentando las seis parejas de reactivos con que se obtuvo las calificaciones en el aspecto técnico para las pruebas para la época de lluvia. Como se aprecia en la Tabla 25 estas combinaciones de reactivos obtuvieron la máxima calificación en los parámetros de turbiedad final, color final, volumen de lodos, partículas no sedimentables y pH; es decir, se obtuvieron valores para estos parámetros dentro de los criterios de calidad en el estudio.

En el caso del valor residual de pH se observó que las combinaciones que incluyen al cloruro férrico con goma de tara y polvo de tuna, no cumplen con el criterio de aceptación establecido (pH residual entre 6,5 y 8,5, de acuerdo a LMP - DS N° 031-2010-SA); por lo que, con estas combinaciones se obtuvo la calificación más baja; sin embargo, en las combinaciones de sulfato de aluminio con goma de tara y polvo de tuna, se obtuvieron calificaciones altas, ya que estos productos prácticamente no modifican el pH del agua, logrando que el valor de este parámetro permanezca en el intervalo de aceptación.

### **c. Aspectos económicos**

En los aspectos económicos se presentan los costos en USD\$/día debido a la inestabilidad en la cotización de la moneda peruana frente al dólar.

El costo de tratamiento se obtuvo sumando el costo estimado por utilizar la dosis de coagulante y la dosis del floculante para una combinación dada al tratar el flujo. En el caso del *Costo de Dosis Mínima*, se calculó utilizando los valores de la dosis mínima del coagulante y la dosis mínima del floculante. El *Costo de Dosis Máxima* se calculó en forma similar, sumando el costo estimado por emplear la dosis máxima del coagulante y la dosis máxima del floculante para el tratamiento de agua.

El intervalo de calificaciones se calcula el costo de tratamiento para todas las combinaciones de reactivos; por ejemplo, las dosis más bajas. Una vez obtenidos los costos se asignó la calificación de cero al costo de tratamiento mayor, y la calificación de cinco al menor costo de tratamiento, entre las combinaciones evaluadas. La diferencia entre el costo más alto y el más bajo obtenido se divide en intervalos igualmente espaciados y a cada uno de esos intervalos se le asigna una calificación.

Los intervalos para la evaluación económica durante la época de lluvias se fijaron de la siguiente manera:

*Costo Dosis Mínima Mezcla:*

- 5 = USD\$ 969 – USD\$ 2 273
- 4 = USD\$ 2 274 - USD\$ 3 578
- 3 = USD\$ 3 579 - USD\$ 4 883
- 2 = USD\$ 4 884 - USD\$ 6 188
- 1 = USD\$ 6 189 - USD\$ 7 490
- 0 > USD\$ 7 490

*Costo Dosis Máxima Mezcla:*

- 5 = USD\$ 4 847 - USD\$ 10 090
- 4 = USD\$ 10 091 - USD\$ 15 334
- 3 = USD\$ 15 335 - USD\$ 20 578
- 2 = USD\$ 20 579 - USD\$ 25 822
- 1 = USD\$ 25 823 - USD\$ 31 065
- 0 > USD\$ 31 065

En la Tabla 26 se presenta los resultados del criterio económico para las calificaciones de las seis combinaciones de reactivos, observándose que las combinaciones del sulfato de aluminio, sulfato ferroso y cloruro férrico con goma de tara, respectivamente, generan los costos más bajos en el tratamiento de agua, obteniéndose calificaciones altas en el aspecto de *Costo de Dosis Mínima*; mientras que con las combinaciones del sulfato de aluminio, sulfato ferroso, y cloruro férrico con polvo de tuna se obtuvo una calificación baja, siendo necesarias altas dosis de coagulantes para cumplir con los criterios aceptables de calidad del agua, lo que genera un alto costo en el tratamiento del agua.

Respecto al aspecto de *Costo de Dosis Máxima*, con dos combinaciones presentan un alto costo el tratamiento y la calificación es baja, siendo estas combinaciones de sulfato de aluminio-polvo de tuna y sulfato ferroso-polvo de tuna; con excepción de estas combinaciones, las otras combinaciones de reactivos presentaron calificaciones altas al generar un costo más bajo en el tratamiento del agua.

Finalmente, al sumar los valores de las columnas *Subtotal* tanto en el criterio técnico como en el económico, se puede conocer la calificación total de cada combinación. Esta calificación se muestra en la columna de extrema derecha en la Tabla 26 llamada *Total*.

**Tabla 25: Resultados de la factibilidad técnica por el método de MDM para las seis combinaciones de coagulante-floculante**

| Coagulante<br>Dosis (mg/L) | Floculante<br>Dosis<br>(mg/L) | Calificación | Turbiedad               | Color                   | Volumen de lodos        | P. No Sedimentables      | pH                      | Subtotal |
|----------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|----------|
|                            |                               |              | (UTN)                   | (U Pt-Co)               | (ml/L)                  | (mg/L)                   |                         |          |
|                            |                               |              | 5 = Optimo (0,0-2,5)    | 5 = Optimo (0,0-2,5)    | 5 = Optimo (0,0-2,5)    | 5 = Optimo (0,0 - 200)   | 5 = Optimo (0,0-2,5)    |          |
|                            |                               |              | 4 = Muy bueno (2,5 - 5) | 4 = Muy bueno (2,5 - 5) | 4 = Muy bueno (2,5 - 5) | 4 = Muy bueno (200 -400) | 4 = Muy bueno (2,5 - 5) |          |
|                            |                               |              | 3 = Bueno (5,0)         | 3 = Bueno (5,0)         | 3 = Bueno (5,0)         | 3 = Bueno (400 - 600)    | 3 = Bueno (5,0)         |          |
|                            |                               |              | 2 = (5,0 – 7,5)         | 2 = (5,0 – 7,5)         | 2 = (5,0 – 7,5)         | 2 = (600 - 800)          | 2 = (5,0 – 7,5)         |          |
|                            |                               |              | 1 = (7,5 – 10,0)        | 1 = (7,5 – 10,0)        | 1 = (7,5 – 10,0)        | 1 = (800 - 1000)         | 1 = (7,5 – 10,0)        |          |
|                            |                               |              | 0 = > 10,0              | 0 = > 10,0              | 0 = > 10,0              | 0 = > 1000               | 0 = > 10,0              |          |
| Sulfato aluminio<br>10-90  | Tara<br>1-5,0                 | A            | 5                       | 4                       | 4                       | 5                        | 5                       | 23       |
|                            |                               | A/B          | 0,2                     | 0,16                    | 0,16                    | 0,2                      | 0,2                     | 0,92     |
|                            |                               | Cp           | 10                      | 8                       | 8                       | 10                       | 10                      | 46       |
| Sulfato aluminio<br>10-90  | Tuna<br>15-50,5               | A            | 5                       | 4                       | 4                       | 5                        | 5                       | 23       |
|                            |                               | A/B          | 0,2                     | 0,16                    | 0,16                    | 0,2                      | 0,2                     | 0,92     |
|                            |                               | Cp           | 10                      | 8                       | 8                       | 10                       | 10                      | 46       |
| Sulfato ferroso<br>10-100  | Tara<br>1-5,0                 | A            | 5                       | 4                       | 4                       | 4                        | 5                       | 22       |
|                            |                               | A/B          | 0,2                     | 0,16                    | 0,16                    | 0,16                     | 0,2                     | 0,88     |
|                            |                               | Cp           | 10                      | 8                       | 8                       | 8                        | 10                      | 44       |
| Sulfato ferroso<br>10-100  | Tuna<br>15-50,5               | A            | 1                       | 0                       | 5                       | 4                        | 5                       | 15       |
|                            |                               | A/B          | 0,04                    | 0                       | 0,2                     | 0,16                     | 0,2                     | 0,60     |
|                            |                               | Cp           | 2                       | 0                       | 10                      | 8                        | 10                      | 30       |
| Cloruro férrico<br>6-30    | Tuna<br>15-50,5               | A            | 5                       | 5                       | 5                       | 4                        | 0                       | 19       |
|                            |                               | A/B          | 0,2                     | 0,2                     | 0,2                     | 0,16                     | 0                       | 0,76     |
|                            |                               | Cp           | 10                      | 10                      | 10                      | 8                        | 0                       | 38       |
| Cloruro férrico<br>6-30    | Tara<br>1-5,0                 | A            | 5                       | 5                       | 5                       | 4                        | 0                       | 20       |
|                            |                               | A/B          | 0,2                     | 0,2                     | 0,2                     | 0,16                     | 0                       | 0,76     |
|                            |                               | Cp           | 10                      | 10                      | 10                      | 8                        | 0                       | 38       |

A: Calificación, A/B = A/ (ni\*Amax) = A/(5\*5); Cp = A/B\*50 (Cp es la calificación ponderada)

**Tabla 26: Resultados de la factibilidad económica por el método de MDM para las seis combinaciones de coagulante – floculante**

| Coagulante<br>Dosis (mg/L) | Floculante<br>Dosis (mg/L) | Evaluación   | Costo de dosis (USD\$/día) |                     | Subtotal       | Total |
|----------------------------|----------------------------|--|----------------------------|---------------------|----------------|-------|
|                            |                            |  | Costo dosis mínima         | Costo dosis máxima  |                |       |
|                            |                            |  | 5 = 969 – 2 273            | 5 = 4 847 – 10 090  |                |       |
|                            |                            |  | 4 = 2 274 – 3 578          | 4 = 10 091 – 15 334 |                |       |
|                            |                            |  | 3 = 3 579 – 4 883          | 3 = 15 335 – 20 578 |                |       |
|                            |                            |  | 2 = 4 884 – 6 188          | 2 = 20 579 – 25 822 |                |       |
|                            |                            |  | 1 = 6 189 – 7 490          | 1 = 25 823 – 31 065 |                |       |
|                            |                            |  | 0 > 7 490                  | 0 > 31 065          |                |       |
| Sulfato aluminio<br>10-90  | Tara<br>1-5,0              | Calificación<br>Cal./Cal. Máxima<br>Cal. Ponderada | 5<br>0,5<br>25             | 5<br>0,5<br>25      | 10<br>1<br>50  | 96    |
| Sulfato aluminio<br>10-90  | Tuna<br>15-50,5            | Calificación<br>Cal./Cal. Máxima<br>Cal. Ponderada | 1<br>0,1<br>5              | 1<br>0,1<br>5       | 2<br>0,2<br>10 | 56    |
| Sulfato ferroso<br>10-100  | Tara<br>1-5,0              | Calificación<br>Cal./Cal. Máxima<br>Cal. Ponderada | 5<br>0,5<br>25             | 3<br>0,3<br>15      | 8<br>0,8<br>40 | 84    |
| Sulfato ferroso<br>10-100  | Tuna<br>15-50,5            | Calificación<br>Cal./Cal. Máxima<br>Cal. Ponderada | 1<br>0,1<br>5              | 1<br>0,1<br>5       | 2<br>0,2<br>10 | 40    |
| Cloruro férrico<br>6-30    | Tuna<br>15-50,5            | Calificación<br>Cal./Cal. Máxima<br>Cal. Ponderada | 1<br>0,1<br>5              | 2<br>0,2<br>10      | 3<br>0,3<br>15 | 53    |
| Cloruro férrico<br>6-30    | Tara<br>1-5,0              | Calificación<br>Cal./Cal. Máxima<br>Cal. Ponderada | 5<br>0,5<br>25             | 4<br>0,4<br>20      | 9<br>0,9<br>45 | 83    |

A: Calificación,  $A/B=A(ni \cdot Amax) = A / (2 \cdot 5)$ ;  $Cp=A/B \cdot 50$  (Cp es la calificación ponderada)



Luego se realizó la selección de las mejores tres combinaciones de reactivos: sulfato de aluminio-tara, sulfato ferroso-tara y cloruro férrico-tara.

Luego, considerando los criterios técnicos (menores residuales de turbiedad, color y volumen de lodos) y aspectos económicos, la mejor combinación para el tratamiento del agua cruda del embalse Cuchoquesera en época de lluvias, es el polímero coagulante sulfato de aluminio en conjunto con el polímero natural floculante goma de tara.

En la Tabla 27 se muestra el análisis de costo de tratamiento del agua al sustituir con la goma de tara una parte del sulfato de aluminio, no siendo viable debido al bajo costo del producto químico y la dosis obtenida en el presente estudio.

**Tabla 27: Análisis de costo de tratamiento de agua**

| <b>Insumos</b>      | <b>Precio<br/>\$/kg</b> | <b>Dosis<br/>kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Costo<br/>\$/m<sup>3</sup></b> | <b>Costo total<br/>\$/m<sup>3</sup></b> |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| Sulfato de aluminio | 2,0                     | 0,090                             | 0,180                             | 0,215                                   |
| Goma de tara        | 7,0                     | 0,005                             | 0,035                             |   |
| Sulfato ferroso     | 2,0                     | 0,100                             | 0,200                             | 0,235                                   |
| Goma de tara        | 7,0                     | 0,005                             | 0,035                             |   |
| Cloruro férrico     | 2,0                     | 0,030                             | 0,060                             | 0,095                                   |
| Goma de tara        | 7,0                     | 0,005                             | 0,035                             |   |

## V. CONCLUSIONES

- 1) En las muestras de agua del embalse Cuchoquesera se realizó la dosificación de coagulantes y floculantes naturales habiéndose removido eficientemente los sedimentos en las muestras, demostrándose que la goma de tara y tuna se pueden utilizar como mejoradores de floculación y obteniendo buena calidad en el agua decantada.
- 2) El agua del embalse Cuchoquesera no es apto para el consumo directo de las personas, por el contenido de partículas en suspensión e impurezas orgánicas, los cuales son características de un agua contaminada.
- 3) Los parámetros físicos y químicos de la muestra de agua del embalse Cuchoquesera (turbidez, pH, color y conductividad), son altos la turbidez y el color, las mismas que se debe reducir en la planta de tratamiento; mientras que su pH se encuentra dentro de los parámetros recomendados; siendo el agua superficial contaminada.
- 4) Los valores registrados de parámetros físicos y químicos se obtuvo el potencial de hidrógeno entre 6,7 y 6,8; la conductividad eléctrica de 169 a 183  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; la turbidez de 1 a 21 UTN; el color de 13 a 37 U Pt-Co; las partículas sedimentables de 0 a 0,2 ml/L y las partículas no sedimentables de 206 a 255 mg/L; siendo estos parámetros que exceden los límites máximos permisibles a excepción del potencial de hidrogeno y la conductividad eléctrica (DS N° 031-2010-SA).
- 5) En el tratamiento del agua del embalse Cuchoquesera, la mejor combinación técnico-económica resultó el coagulante sulfato de aluminio con floculante goma de tara, con dosis óptimas de 27,9 y 3 mg/L, que removieron los sedimentos suspendidos, obteniendo, un efluente con 1,7 UTN y 3,2 U Pt-Co de turbidez y color, respectivamente.
- 6) Se evaluó la factibilidad técnica-económica de las combinaciones de coagulantes floculantes empleando una matriz de decisión multicriterio, considerando cinco aspectos técnicos y dos aspectos económicos, siendo la combinación de reactivos con la más alta calificación que fue la formada por sulfato de aluminio-goma de tara.

## VI. RECOMENDACIONES

- 1) En este estudio se evaluó el mejoramiento de la calidad del agua mediante el proceso de la coagulación-floculación, a escala laboratorio, aplicando diferentes reactivos coagulantes y floculantes naturales en dosis variadas. Sin embargo, también es necesario, estudiar las condiciones de mezclado, dado que son factores que tienen influencia sobre la eficiencia de tratamiento de estos procesos.
- 2) Realizar pruebas de coagulación-floculación en planta piloto, tanto para la época de lluvias como para la época de estiaje, aplicando las combinaciones de dosis de coagulante y floculante natural.
- 3) Continuar con los estudios de la goma de tara y tuna como mejoradores de coagulación, en aguas de diversas fuentes y realizar una comparación con un polímero sintético que exista en el mercado.
- 4) Continuar con el monitoreo periódico de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, sobre todo aquellos que sobrepasaron el ECA del agua, en diferentes épocas del año, para el seguimiento de la calidad del agua en el embalse Cuchoquesera.
- 5) Buscar procesos que permitan aislar el principio activo coagulante presente en la tuna (*Opuntia ficus-indica*) y tara (*Caesalpinia spinoza*) para aumentar su eficiencia en la remoción de turbidez y color en aguas crudas.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arboleda, VJ. 1981. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. CEPIS. Lima, Perú; p. 14 – 17.
- Aguilar, A. 2010. Utilización de las semillas de tara como ayudante de coagulación en el tratamiento de agua. Lima, Perú.
- Andía, C. 2000. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico. Tratamiento de agua: coagulación floculación. SEDAPAL. Lima, Perú.
- APHA (American Public Health Association, USA); AWWA (American Water Works Association, USA). 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. EUA.
- ASTM (American Standard Test Materials, USA). 2003. ASTM D2035 – 08. Standard practices for coagulation – flocculation jar test of water. EUA, 4 p.
- AWWA (American Water Works Association, USA). 1990. Water quality and treatment. EUA, 1194 p.
- AWWA (American Water Works Association, USA). 2000. Water quality and treatment. USA.
- Bache, DH. 2007. Floccs in water treatment. Inglaterra, 297 p.
- Benefield, LD. 1982. Process chemistry for water and wastewater treatment. EUA, 510 p.
- Bolto, B; Dixon, D; Eldridge, R; King, S. 2001. Cationic polymer and clay or metal oxide combinations for natural organic matter removal. *Water Research*, 35 (11): 2669-2676.
- Bolto, B; Gregory, J. 2007. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research*, 41 (11): 2301-2324.

- Bratby, J. 2006. Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. Inglaterra, 407 p.
- Chang, EE; Chiang, PC; Tang, WY; Chao, SH; Hsing, HJ. 2005. Effects of polyelectrolytes on reduction of model compounds via coagulation. *Chemosphere*, 58 (8): 1141-1150.
- Decreto Supremo N° 031-2010-S.A. Reglamento de la calidad del agua para consumo humano. Lima, Perú.
- Degrémont, P. 1996. Water treatment handbook. Francia.
- De Wolfe, J; Dempsey, B; Taylor, M; Potter, JW. 2003. Guidance manual for coagulant changeover. EUA, 185 p.
- DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental, Perú). 2008. Protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales. Dirección de ecología y protección del ambiente, área de protección de los recursos hídricos, Ministerio de Salud.
- Donato, N; Navarro, R; Ávila, M. 2006. Obtención de sulfato de quitosano y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de suspensiones coloidales aniónicas de caolinita. *Revista Iberoamericana de polímero*, vol.7.
- Duan, J; Gregory, J. 2003. Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100-102: 475-502.
- Edwards, M; Scandna, P; Mcneill, L. 2006. Enhanced coagulation impacts on water treatment plant infrastructure. EUA, 106 p.
- Egeberg, PK; Eikenes, M; Gjessing, ET. 1999. Organic nitrogen distribution in NOM size classes. *Environment International*, 25 (2): 225-236.
- Franceschi, M; Girou, A; Maurette MT. 2002. Optimization of the coagulation – flocculation process of raw water by optimal design method, *Water Research* 36, 3561–3572.
- González, M; Hernández, C; Kaehler, J. 1991. Determinación de aluminio en el agua potable de Valencia y localidades cercanas. Venezuela.

- GRA (Gobierno Regional de Ayacucho). 2015. PERC, OPEMAN.
- Granados, N. 2007. Determinación de la dosis más efectiva de la mezcla de carbón activado en polvo con sulfato de aluminio líquido para la potabilización de agua en la empresa aguas de Pereira. Colombia.
- Gregor, J; Maršálek B. 2004. Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods. *Water Research*, 38 (3): 517-522.
- Gutiérrez PH. 2008. Análisis y diseño de experimentos. México, 545 p.
- Gutiérrez, P; De La Vara, SR. 2008. Análisis y diseño de experimentos. México, 545 p.
- Henderson, R; Parsons, SA; Jefferson, B. 2008. The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae. *Water Research*, 42 (8-9): 1827-1845.
- Hendricks, DW. 2006. Water treatment unit processes: physical and chemical. EUA.
- Knappe, RU; Belk RC; Gandy S; Neerja R. 2004. Algae detection and removal strategies for drinking water treatment plants. EUA, 466 p.
- Kelderman, P; Kruis, G. 2001. Laboratory course aquatic chemistry and its applications in environmental engineering international. Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering. Holanda.
- Ma, J; Li, GB; Chen, ZL; Xu, GR; Cai, GQ. 2001. Enhanced coagulation of surface waters with high organic content by permanganate preoxidation, *Water Science and Technology: Water Supply*, 1:1: 51 - 61.
- Matilainen, A; Vepsäläinen, M; Sillanpää, M. 2010. Removal of natural organic matter from drinking water by advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 80 (4): 351-365.
- Montgomery, DC. 2004. Diseño y análisis de experimentos. México.
- Montgomery, JM. 1985. Water treatment principles and design. EUA, 696 p.
- MWH (My Wish Hub, USA). 2005. Water treatment principles and design. EUA, 1948 p.

- Orellana, E. 2013. Diseño de experimentos aplicados en ciencias forestales y ambientales. Perú, 160 p.
- Parsons, SA; Jefferson, B. 2006. Introduction to potable water treatment processes. Reino Unido, 179 p.
- Pérez, J. 1973. Estado del Arte – Coagulación. CEPIS. Lima, Perú; p. 15 - 20.
- Pizzi, NG. 2005. Water treatment operator handbook. EUA, 251p.
- Rigas, F; Papadopoulou, K; Dritsa, V; Doulia, D. 2007. Bioremediation of a soil contaminated by lindane utilizing the fungus *Ganoderma australe* via response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 140 (1-2): 325-332.
- Romero, RJ. 2000. Calidad del agua. Escuela Colombiana de Ingeniería; p. 452-468.
- Romero, L; Vargas, M. 2006. Aprovechamiento de algunos materiales como floculantes y coagulantes. *Tecnología en marcha*, Vol. 19.
- Rossner, A; Snyder, SA; Knappe, RU. 2009. Removal of emerging contaminants of concern by alternative adsorbents. *Water Research*, 43 (15): 3787-3796.
- Sharp, EL; Parsons, SA; Jefferson, B. 2006. Seasonal variations in natural organic matter and its impact on coagulation in water treatment. *Science of the total environment*, 363 (1-3): 183-194.
- Spellman, FR. 2008. Handbook of water and wastewater treatment plant operations. EUA, 872 p.
- Spellman, FR. 2008. The science of water: concepts and applications. EUA, 422p.
- Steel, E; Mcghee J. 1991. Abastecimiento de agua y alcantarillado. Barcelona.
- Tan, IA; Ahmad, AL; Hameed BH. 2008. Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 137 (3), 462-470.
- Tomaszewska, M; Mozia, S; Morawski, AW. 2004. Removal of organic matter by coagulation enhanced with adsorption on PAC. *Desalination*, 161 (1), 79-87.

- Turchiuli, C; Fargues, C. 2004. Influence of structural properties of alum and ferric flocs on sludge de water ability. *Chemical Engineering Journal*, 103 (1-3): 123-131.
- Valencia, J. 2000. Teoría y práctica de la purificación del agua. Colombia.
- Vilca, TI. 2009. Modelamiento numérico de infiltración en presas con el método de volúmenes finitos: caso presa Cuchoquesera Ayacucho. Perú.
- Villón, M. 2002. HEC - HMS. Perú.
- Wang, LK; Hung Y; Shammas, NK. 2005. Physicochemical treatment processes. EUA, 744 p.
- Wilderer, PA; Schwarzenbeck, N; Zhu, J. 2003. Water in China. Inglaterra, 256 p.
- Zouboulis, A; Traskas, G; Samaras, P. 2008. Comparison of efficiency between poly-aluminium chloride and aluminium sulphate coagulants during Full-scale experiments in a drinking water treatment plant', *Separation Science and Technology*, 43:6, 1507 - 1519.



## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1. PRECIPITACIÓN EN EL EMBALSE CUCHOQUESERA (2018)

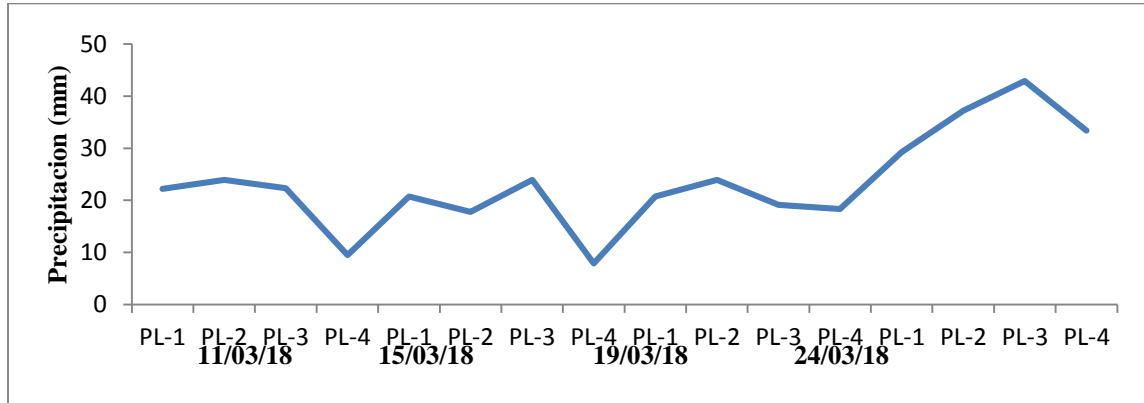


Figura 20: Precipitación 8/03/2018 – 24/03/2018

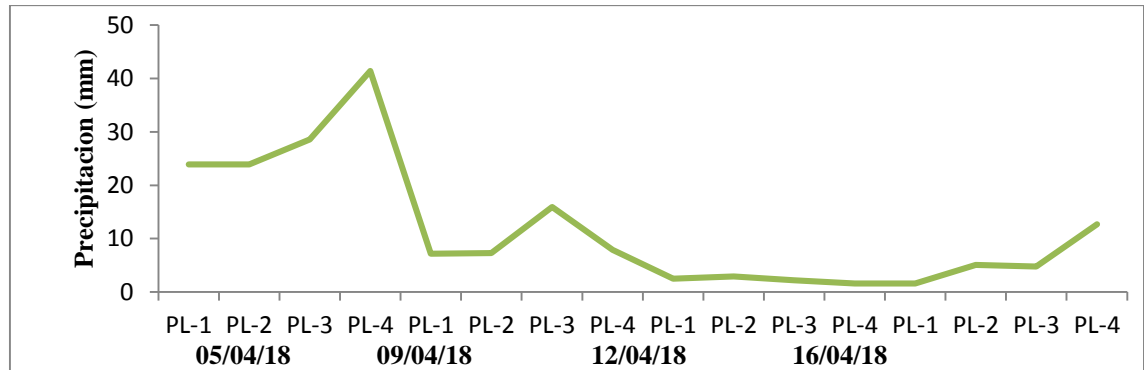


Figura 21: Precipitación 5/04/2018 – 16/04/2018

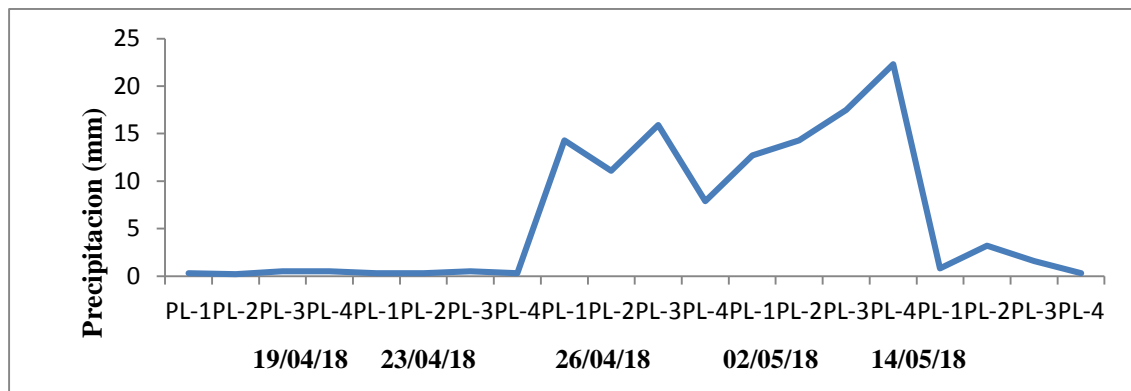


Figura 22: Precipitación 19/04/2018 – 14/05/2018

## ANEXO 2. TURBIDEZ EN LA P.T. QUICAPATA (2016-2017)

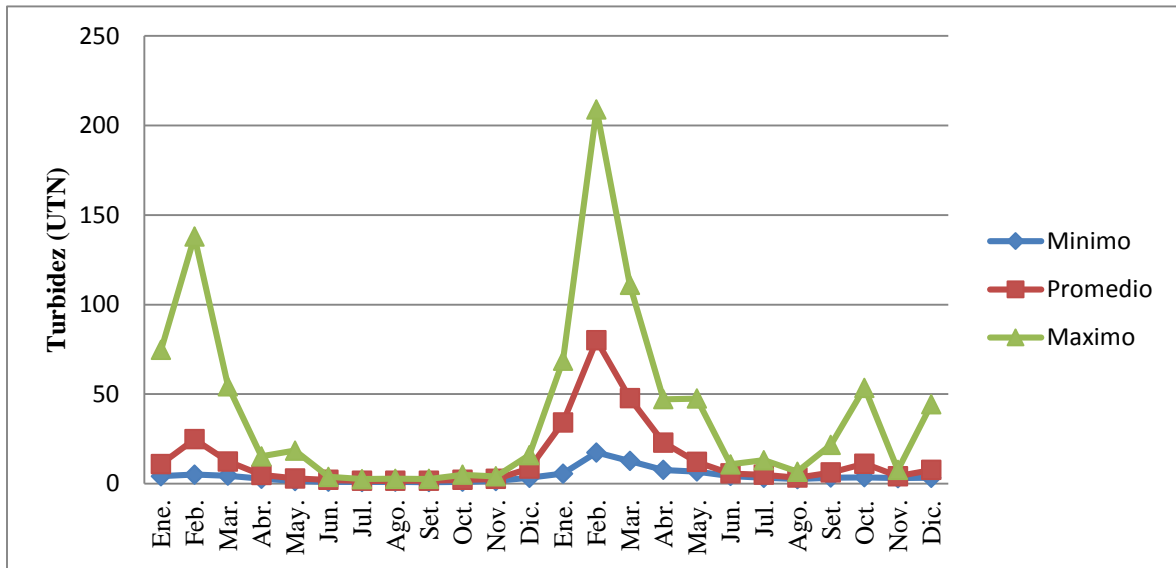


Figura 23: Variación de la turbidez cruda en la P.T. Quicapata

### ANEXO 3. SUSTANCIAS QUÍMICAS USADAS PARA LA COAGULACIÓN

**Tabla 28: Principales sustancias químicas usadas para la coagulación**

| Nombre y fórmula   | Nombre común   | Presentaciones disponibles                         | Densidad Kg/m <sup>3</sup>                            | Solubilidad Kg/m <sup>3</sup>      | Características  |
|--|--|--|---|------------------------------------|--|
| Sulfato de aluminio<br>Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·14H <sub>2</sub> O | Alumbre  | Polvo, granular, terrones, líquido de color marfil | 609 -721;<br>961 – 1 009;<br>993 – 1 073;<br>1,2 kg/l | 303                                | pH = 3,4 en solución al 1%   |
| Cloruro férrico<br>FeCl <sub>2</sub>   | Ferricloro<br>Cloruro de Hierro                            | Jarabe carmelita oscuro                            | 1 009   | Total                              | -  |
| FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O   | Cloruro Férrico  | Cristales amarillos carmelitosos                   | -   | -                                  | Higroscópico, se almacena en recipientes herméticos                                    |
| FeCl <sub>3</sub>  | Cloruro Férrico Anhidro                                    | Polvo verde negruzco                               | -   | -                                  | herméticos   |
| Sulfato férrico<br>Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O      | Ferri floc.<br>Ferri sul.                                  | Polvo con gránulos rojo-carmelitosos               | 1 121   | Soluble en 2/4 partes de agua fría | Semihigroscópico coagulante a pH = 3,5 - 11,0  |
| Sulfato ferroso<br>FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                                    | Coperas<br>Vitriol-Verde                                   | Cristales verdes, granular, terrones               | 1 009 - 1 057   | -                                  | Higroscópico, pH óptimo 8,5 -11,0  |
| Sulfato de aluminio potásico   | Alumbre potásico   | terrones, granulados, polvo                        | 993 – 1 073<br>961 – 1 041<br>961                     | 60<br>120<br>168                   | pH = 3,5 en solución al 3,5%<br>Requiere tolva con agitación para dosificación en seco |
| Aluminato de sodio<br>Na <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                       | Alumbre soda   | Polvo carmelita, líquido                           | 801 - 961   | 360<br>395                         | con agitación para dosificación en seco  |
| Silicato de sodio<br>Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                                      | Vidrio líquido o Vidrio soluble<br>Arcilla coloidal granel | Líquido viscoso opaco                              | -   | Completa                           | pH = 12,3 en solución al 1%  |
| Bentonita  | Arcilla coloidal granel                                    | Polvo granular                                     | 961   | Insoluble                          | -  |
| Hidróxido de calcio<br>Ca(OH) <sub>2</sub>   | Cal apagada  | Polvo  | 320 - 801   | Pobre                              | Alcalina incrustante<br>Ácido alcalino requiere dilución para su uso                   |
| Polímero catiónico   | Varios   | Líquido viscoso                                    | 1 041 - 1 201   | Completa                           | requiere dilución para su uso  |
| Polímero aniónico  | Varios   | La mayoría secos                                   | 705 - 737   | -                                  | Higroscópico   |
| Polímero no iónico   | Varios   | La mayoría secos                                   | 705 - 737   | -                                  | Higroscópico   |



#### ANEXO 4. FOTOGRAFIAS



**Figura 24: Representación panorámica de las aguas en el embalse Cuchoquesera**



**Figura 25: Proceso de obtención del polvo de tuna**



**Figura 26: Polvo de tuna**



**Figura 27: Resultados en cono de *Imoff***





**Figura 28: Prueba de jarras**



**Figura 29: Afluente del rio Cachi al embalse Cuchoquesera**

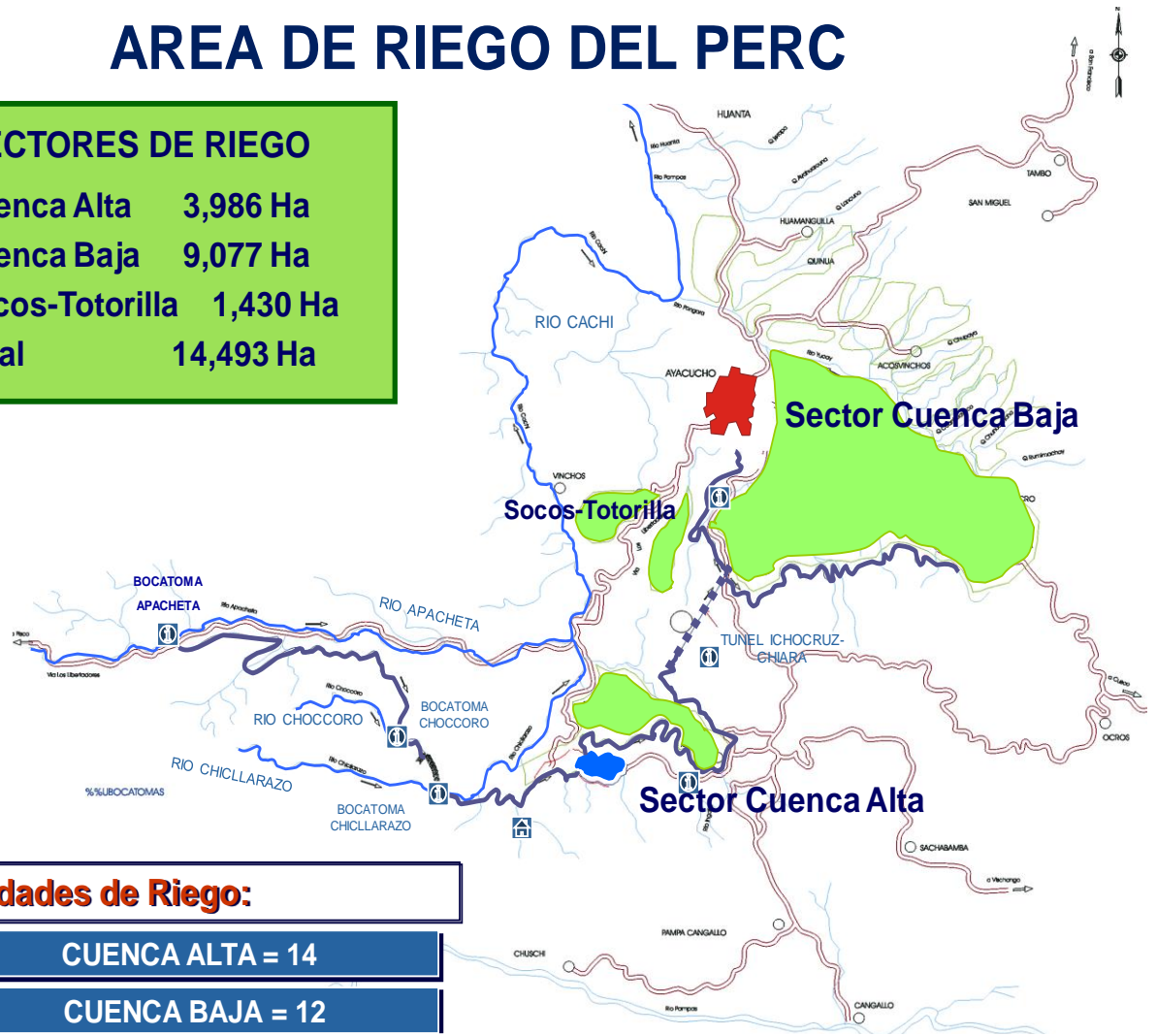


**Figura 30: Aguas en el embalse Cuchoquesera**

ANEXO 5: ESQUEMA HIDRAULICO DEL EMBALSE CUCHOQUESERA

## AREA DE RIEGO DEL PERC

| SECTORES DE RIEGO |                  |
|-------------------|------------------|
| Cuenca Alta       | 3,986 Ha         |
| Cuenca Baja       | 9,077 Ha         |
| Socos-Totorilla   | 1,430 Ha         |
| <b>Total</b>      | <b>14,493 Ha</b> |



| Unidades de Riego:      |
|-------------------------|
| <b>CUENCA ALTA = 14</b> |
| <b>CUENCA BAJA = 12</b> |

Figura 31: Esquema hidráulico del embalse Cuchoquesera

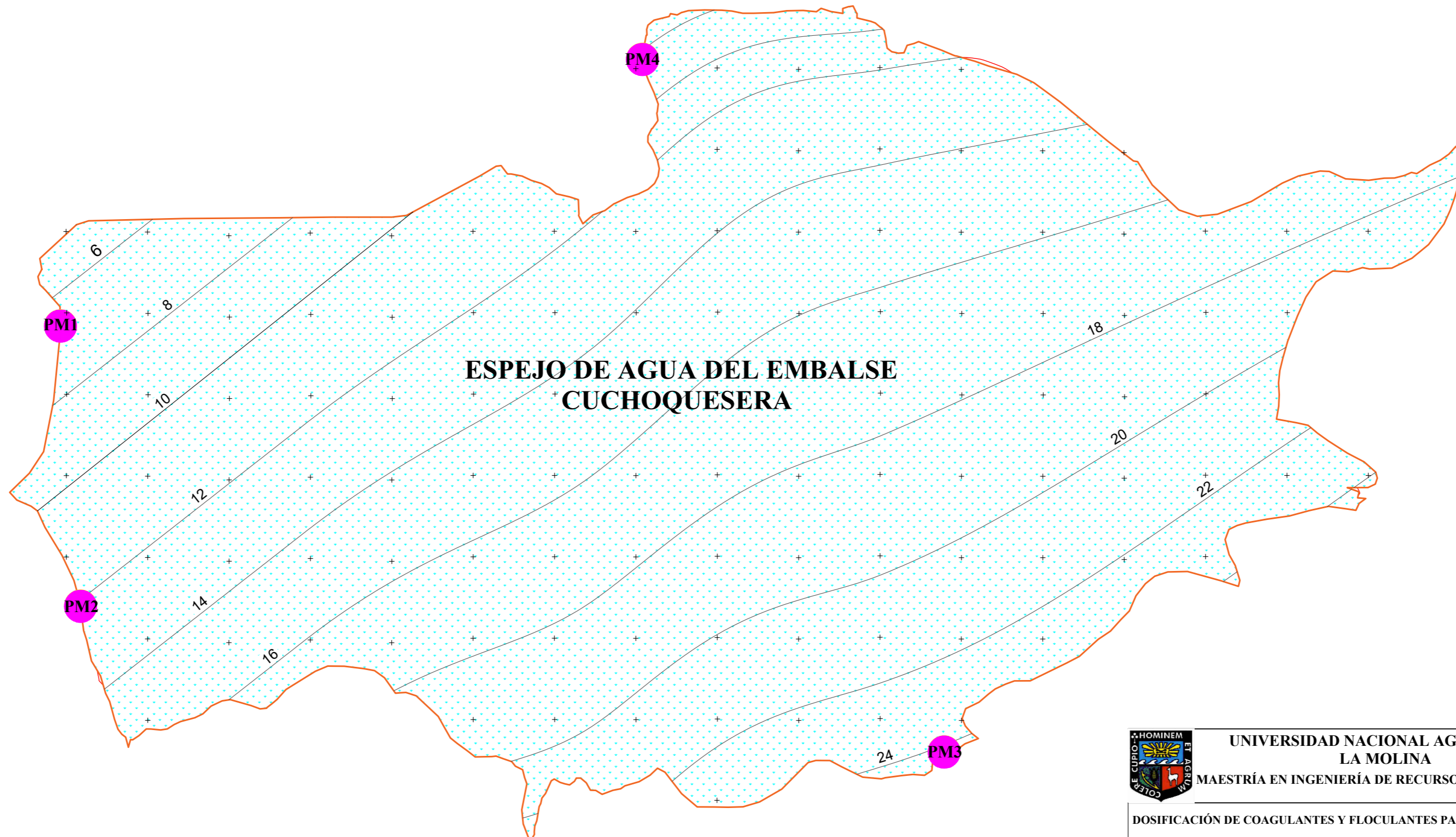
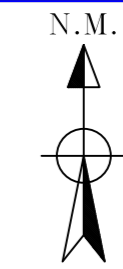
FUENTE: GRA (2015)



## **ANEXO 6. PLANOS**

570 600 E 570 800 E 571 000 E 571 200 E 571 400 E 571 600 E 571 800 E 572 000 E 572 200 E 572 400 E 572 600 E 572 800 E 573 000 E 573 200 E 573 400 E 573 600 E 573 800 E 574 000 E 574 200 E 574 400 E 574 600 E

8 515 400 N 8 515 200 N 8 515 000 N 8 514 800 N 8 514 600 N 8 514 400 N 8 514 200 N 8 514 000 N 8 513 800 N 8 513 600 N 8 513 400 N 8 513 200 N 8 513 000 N 8 512 800 N



**ESPEJO DE AGUA DEL EMBALSE  
CUCHOQUESERA**

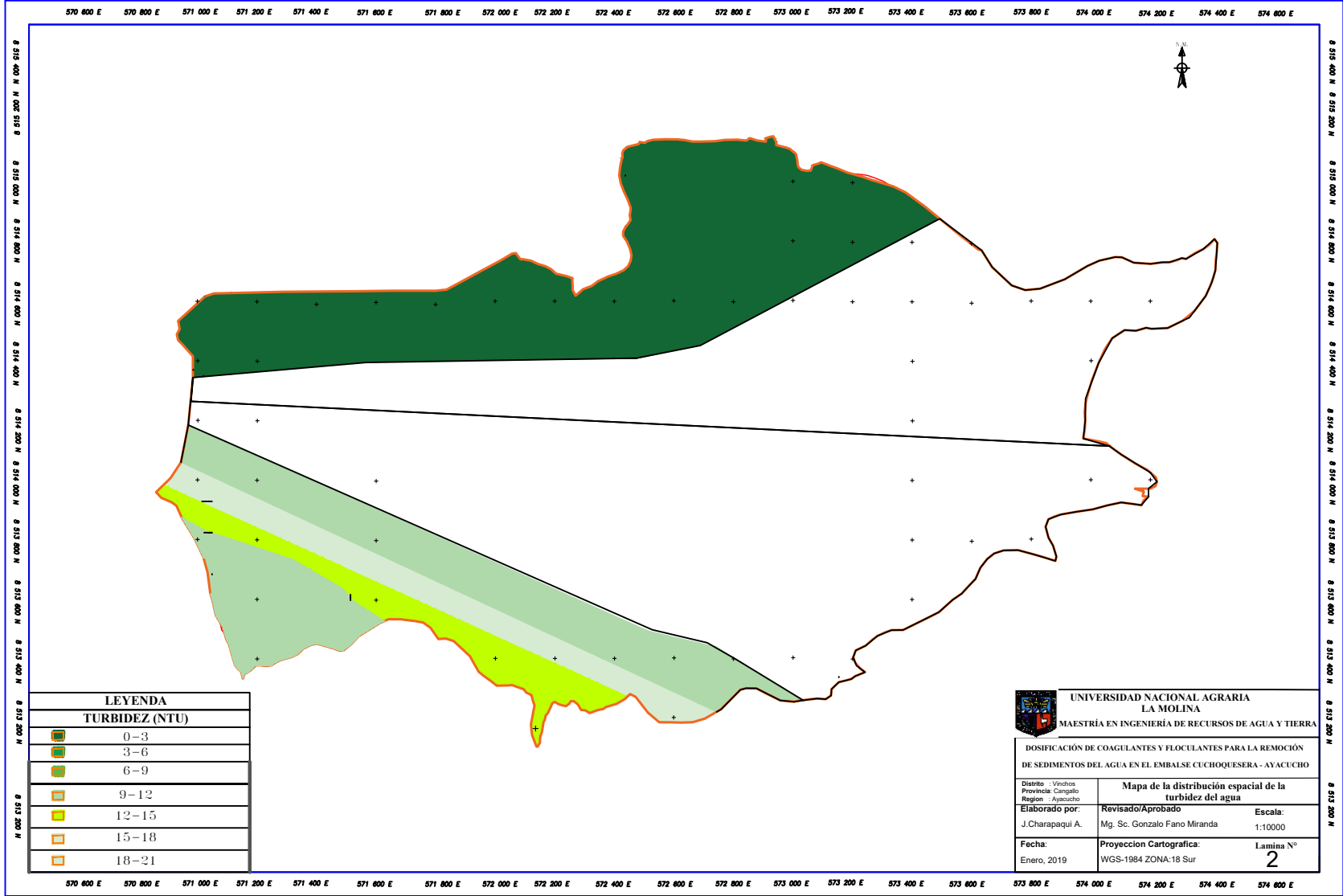
| LEYENDA |                              |
|---------|------------------------------|
|         | REPRESA CUCHOQUESERA         |
|         | CURVAS DE PRECIPITACION (mm) |
|         | ESTACION DE MUESTREO         |

| COORDENADAS UTM - WGS84 ZONA SUR, DE LAS ESTACIONES PLUVIOMETRICAS |         |           |                  |
|--|---------|-----------|------------------|
| ESTACIONES PLUVIOMETRICAS  | ESTE    | NORTE     | ALTITUD m.s.n.m. |
| PM1  | 570 986 | 8 514 368 | 3 732            |
| PM2  | 571 049 | 8 513 681 | 3 750            |
| PM3  | 573 154 | 8 513 336 | 3 751            |
| PM4  | 572 437 | 8 515 021 | 3 748            |

|  |   |
|--|---|
| <p><b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA<br/>LA MOLINA</b><br/>MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA</p>               |   |
| <p>DOSIFICACIÓN DE COAGULANTES Y FLOCULANTES PARA LA REMOCIÓN DE SEDIMENTOS DEL AGUA EN EL EMBALSE CUCHOQUESERA - AYACUCHO</p> |   |
| <p>Distrito : Vinchos<br/>Provincia: Cangallo<br/>Region : Ayacucho</p>  | <p><b>Mapa de distribución espacial de la precipitación</b></p> |
| <p>Elaborado por:<br/>J.Charapaqui A.</p>  | <p>Revisado/Aprobado<br/>Mg. Sc. Gonzalo Fano Miranda</p>       |
| <p>Fecha:<br/>Enero, 2019.</p>   | <p>Proyeccion Cartografica:<br/>WGS-1984 ZONA:18 Sur</p>        |
|  | <p>Escala:<br/>1:10000</p> <p>Lamina N°<br/><b>1</b></p>        |

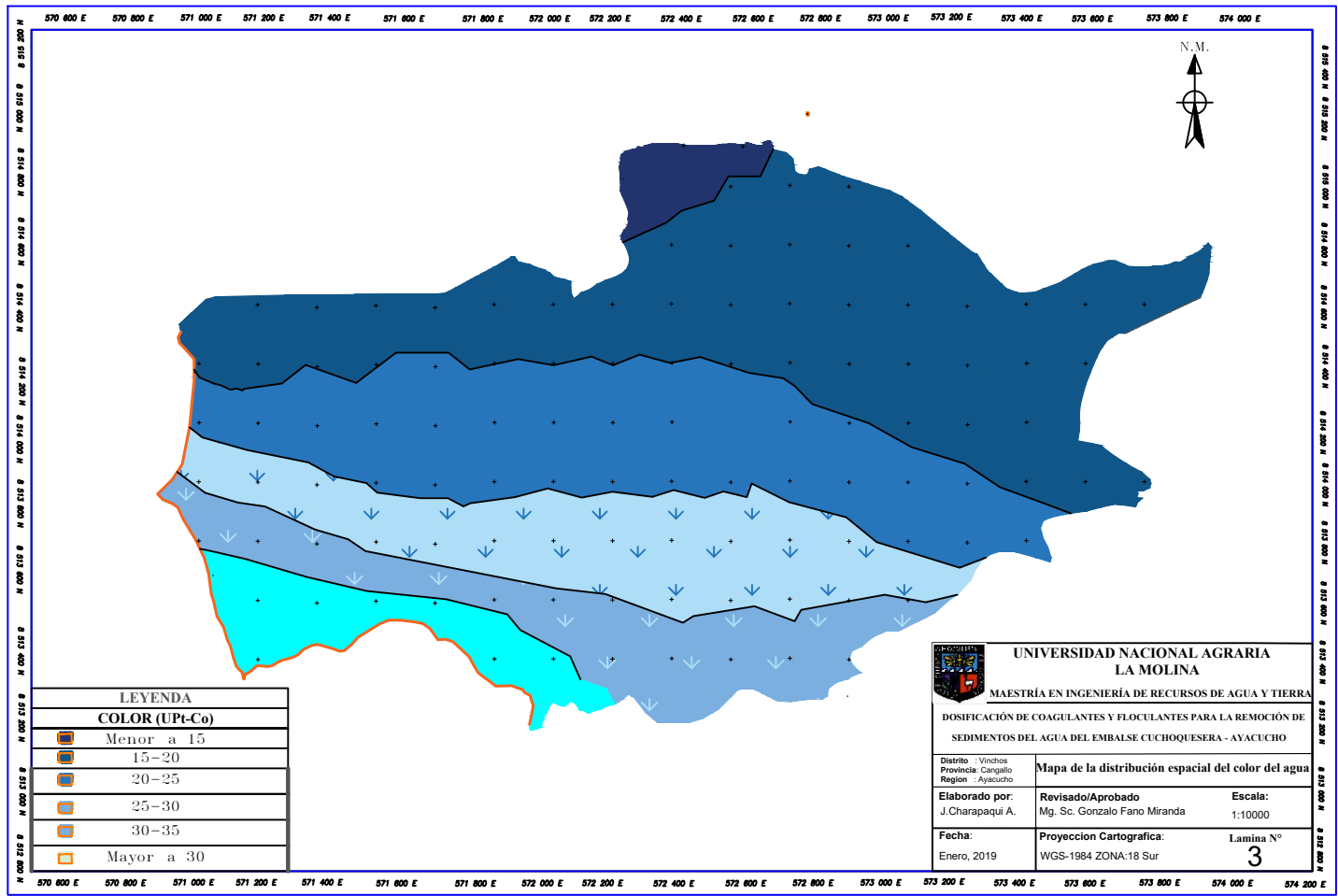
570 600 E 570 800 E 571 000 E 571 200 E 571 400 E 571 600 E 571 800 E 572 000 E 572 200 E 572 400 E 572 600 E 572 800 E 573 000 E 573 200 E 573 400 E 573 600 E 573 800 E 574 000 E 574 200 E 574 400 E 574 600 E

8 515 400 N 8 515 200 N 8 515 000 N 8 514 800 N 8 514 600 N 8 514 400 N 8 514 200 N 8 514 000 N 8 513 800 N 8 513 600 N 8 513 400 N 8 513 200 N 8 513 000 N 8 512 800 N



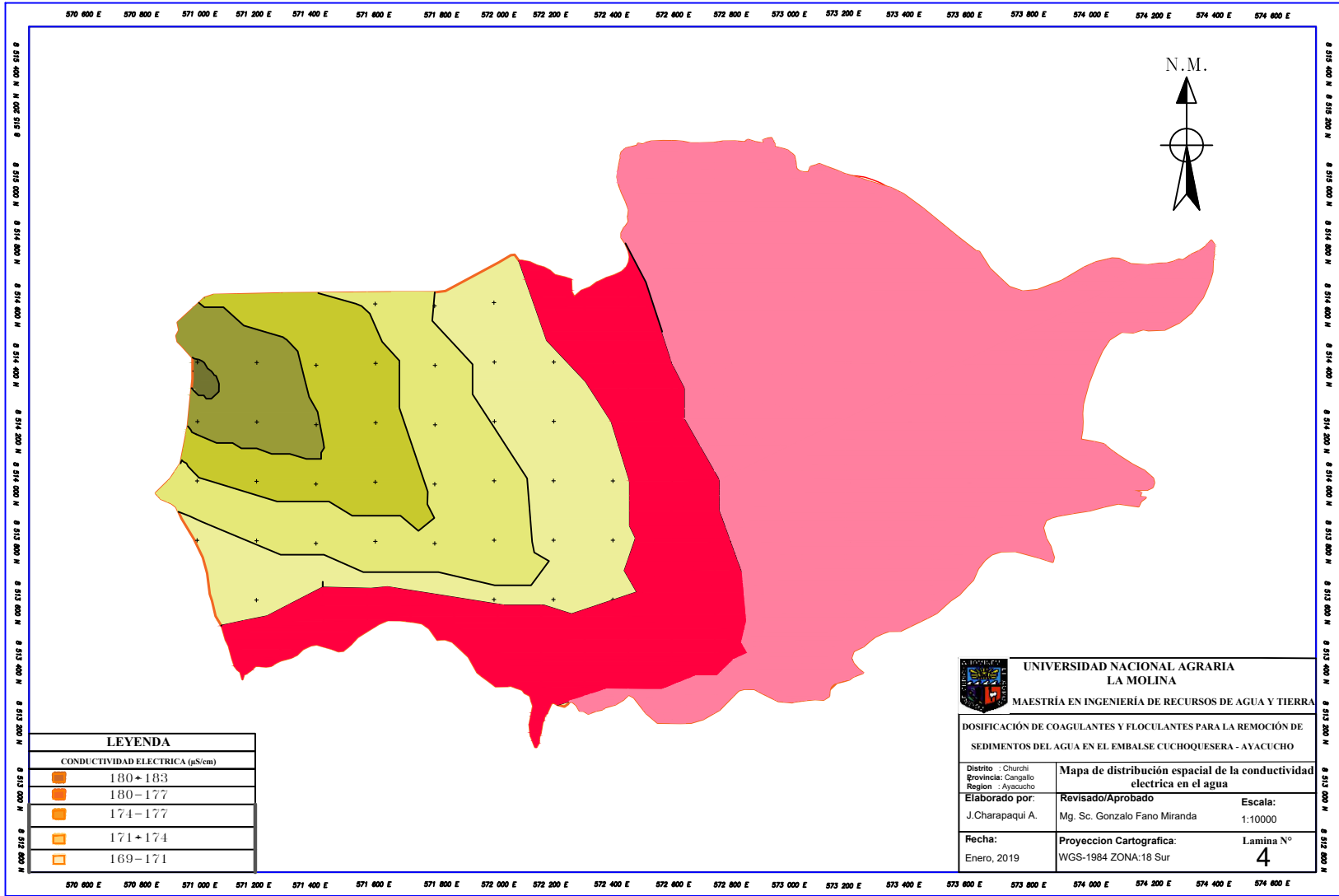
| LEYENDA        |       |
|----------------|-------|
| TURBIDEZ (NTU) |       |
|                | 0-3   |
|                | 3-6   |
|                | 6-9   |
|                | 9-12  |
|                | 12-15 |
|                | 15-18 |
|                | 18-21 |

|  |   |                       |
|--|---|-----------------------|
| <b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA<br/>LA MOLINA</b><br>MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA                   |   |                       |
| DOSIFICACIÓN DE COAGULANTES Y FLOCULANTES PARA LA REMOCIÓN<br>DE SEDIMENTOS DEL AGUA EN EL EMBALSE CUCHOQUESERA - AYACUCHO |   |                       |
| Distrito : Witches<br>Provincia : Cangallo<br>Región : Ayacucho  | <b>Mapa de la distribución espacial de la<br/>turbidez del agua</b> |                       |
| Elaborado por:<br>J.Charapaqui A.  | Revisado/Aprobado:<br>Mg. Sc. Gonzalo Fano Miranda                  | Escala:<br>1:10000    |
| Fecha:<br>Enero, 2019  | Proyeccion Cartografica:<br>WGS-1984 ZONA:18 Sur                    | Lamina N°<br><b>2</b> |




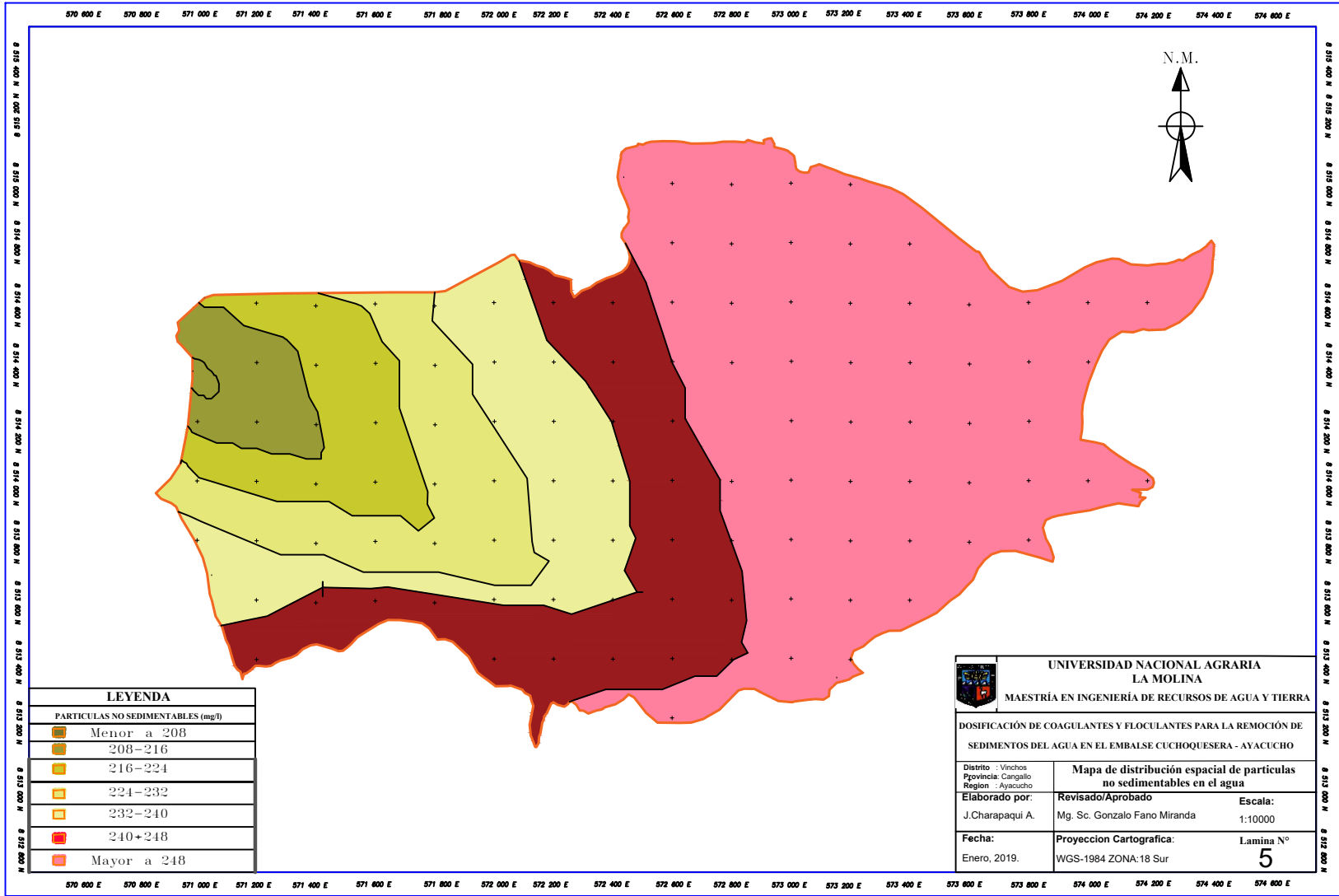
| LEYENDA        |            |
|----------------|------------|
| COLOR (UPT-Co) |            |
|                | Menor a 15 |
|                | 15-20      |
|                | 20-25      |
|                | 25-30      |
|                | 30-35      |
|                | Mayor a 30 |

|   |  |                              |
|---|--|------------------------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA<br/>LA MOLINA</b> |  |                              |
| MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA   |  |                              |
| DOSIFICACIÓN DE COAGULANTES Y FLOCULANTES PARA LA REMOCIÓN DE<br>SEDIMENTOS DEL AGUA DEL EMBALSE CUCHOQUESERA - AYACUCHO                |  |                              |
| Distrito : Vinchos<br>Provincia : Cangallo<br>Región : Ayacucho   | <b>Mapa de la distribución espacial del color del agua</b> |                              |
| <b>Elaborado por:</b><br>J. Charapaqui A.   | <b>Revisado/Aprobado</b><br>Mg. Sc. Gonzalo Fano Miranda   | <b>Escala:</b><br>1:10000    |
| <b>Fecha:</b><br>Enero, 2019  | <b>Proyeccion Cartografica:</b><br>WGS-1984 ZONA:18 Sur    | <b>Lamina N°</b><br><b>3</b> |



| LEYENDA                         |         |
|---------------------------------|---------|
| CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (µS/cm) |         |
|                                 | 180+183 |
|                                 | 180-177 |
|                                 | 174-177 |
|                                 | 171+174 |
|                                 | 169-171 |

|   |   |                       |
|---|---|-----------------------|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA<br/>LA MOLINA</b> |   |                       |
| MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA   |   |                       |
| DOSIFICACIÓN DE COAGULANTES Y FLOCULANTES PARA LA REMOCIÓN DE<br>SEDIMENTOS DEL AGUA EN EL EMBALSE CUCHOQUESERA - AYACUCHO              |   |                       |
| Distrito : Churchi<br>Provincia: Cangallo<br>Region : Ayacucho  | <b>Mapa de distribución espacial de la conductividad<br/>eléctrica en el agua</b> |                       |
| Elaborado por:<br>J.Charapaqui A.   | Revisado/Aprobado<br>Mg. Sc. Gonzalo Fano Miranda                                 | Escala:<br>1:10000    |
| Fecha:<br>Enero, 2019   | Proyeccion Cartografica:<br>WGS-1984 ZONA:18 Sur                                  | Lamina Nº<br><b>4</b> |



| LEYENDA                            |             |
|------------------------------------|-------------|
| PARTICULAS NO SEDIMENTABLES (mg/l) |             |
|                                    | Menor a 208 |
|                                    | 208-216     |
|                                    | 216-224     |
|                                    | 224-232     |
|                                    | 232-240     |
|                                    | 240+248     |
|                                    | Mayor a 248 |

|   |  |                       |
|---|--|-----------------------|
| <b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA</b><br>MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS DE AGUA Y TIERRA                    |  |                       |
| DOSIFICACIÓN DE COAGULANTES Y FLOCULANTES PARA LA REMOCIÓN DE SEDIMENTOS DEL AGUA EN EL EMBALSE CUCHOQUESERA - AYACUCHO |  |                       |
| Distrito : Vinchos<br>Provincia : Cangallo<br>Región : Ayacucho   | <b>Mapa de distribución espacial de partículas no sedimentables en el agua</b> |                       |
| Elaborado por:<br>J.Charapaqui A.   | Revisado/Aprobado<br>Mg. Sc. Gonzalo Fano Miranda                              | Escala:<br>1:10000    |
| Fecha:<br>Enero, 2019.  | Proyeccion Cartografica:<br>WGS-1984 ZONA:18 Sur                               | Lamina N°<br><b>5</b> |