

**EVALUACIÓN DE ALCALINIZANTES EN EL PROCESO DE AJUSTE DEL pH  
PARA EL AGUA TRATADA DEL RÍO CAUCA**

**YURANI CRUZ ROJAS**

Código: 0745693

**MAYDA NATALIA LÓPEZ**

Código: 0740658

**DIRECTORAS:**

**Prof. PATRICIA TORRES LOZADA**

Ing, Sanitaria, Ph.D.

**KAREN ALEJANDRA BUENO ZABALA**

Ing. Sanitaria, MSc.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL  
SANTIAGO DE CALI  
2015**

---

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

Ing. Carolina Montoya Pachongo

---

Ing. Luis German Delgado

**Santiago de Cali, Septiembre de 2015**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por el don de la vida y las bendiciones recibidas.

A nuestros padres y hermanos por apoyarnos en nuestra formación académica.

A la Profesora Patricia Torres Lozada por su dedicación y orientación en nuestra formación profesional.

A la Ingeniera Karen Alejandra Bueno Zabala, por confiar en nosotras, compartir sus conocimientos, aclarar nuestras dudas y motivarnos durante el desarrollo del proyecto.

A nuestros compañeros y amigos por compartir sus conocimientos y brindarnos su apoyo.

A la universidad del Valle por acogernos y formarnos como profesionales.

A EMCALI ESP EICE - Ing. Juan Carlos Escobar Jefe de Operación, por brindarnos el espacio para las prácticas y suministrarnos información para el desarrollo del proyecto.

A los evaluadores Ing. Carolina Montoya Pachongo e Ing. Luis German Delgado, por sus valiosos aportes.

Al grupo de Investigación Estudio y Control de la contaminación Ambiental-ECCA y el programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

*Yurani Cruz*

*Mayda Natalia López*

## TABLA DE CONTENIDO

|       |                                                                                                                                                 |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUCCION.....                                                                                                                               | 8  |
| 2     | ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION .....                                                                                                              | 8  |
| 3     | OBJETIVOS.....                                                                                                                                  | 13 |
| 3.1   | Objetivo General .....                                                                                                                          | 13 |
| 3.2   | Objetivos Específicos .....                                                                                                                     | 13 |
| 4     | REVISIÓN DE LITERATURA .....                                                                                                                    | 14 |
| 4.1   | Procesos de Tratamiento .....                                                                                                                   | 14 |
| 4.2   | Ajuste del pH.....                                                                                                                              | 15 |
| 4.2.1 | Sistema carbonato .....                                                                                                                         | 16 |
| 4.2.2 | Alcalinizantes .....                                                                                                                            | 19 |
| 4.2.3 | Experiencias en el uso de alcalinizantes .....                                                                                                  | 23 |
| 5     | MATERIALES Y MÉTODOS.....                                                                                                                       | 26 |
| 5.1   | Descripción general .....                                                                                                                       | 26 |
| 5.1.1 | Localización del estudio.....                                                                                                                   | 26 |
| 5.1.2 | Descripción general de la PTAP de Puerto Mallarino .....                                                                                        | 26 |
| 5.1.3 | Descripción general de la fuente de abastecimiento.....                                                                                         | 27 |
| 5.1.4 | Descripción general del SDA .....                                                                                                               | 28 |
| 5.2   | Componente 1: Identificación de los alcalinizantes de mayor aplicabilidad para el proceso de ajuste del pH del agua tratada del río Cauca ..... | 29 |
| 5.2.1 | Etapa I: Comparación de los principales alcalinizantes utilizados en el proceso de ajuste del pH .....                                          | 29 |
| 5.2.2 | Etapa II: Análisis de los alcalinizantes de mayor aplicación en el proceso de ajuste del pH .....                                               | 29 |
| 5.3   | Componente 2: Evaluación a escala de laboratorio de dos alcalinizantes para el ajuste del pH del agua tratada del río Cauca.....                | 29 |
| 5.3.1 | Etapa III: Recopilación, sistematización y análisis estadístico de información histórica .....                                                  | 29 |
| 5.3.2 | Etapa IV: Monitoreos del agua tratada .....                                                                                                     | 30 |
| 5.3.3 | Etapa V: Determinación de la concentración de aplicación para los alcalinizantes NaOH y NaHCO <sub>3</sub> .....                                | 31 |
| 5.3.4 | Etapa VI: Evaluación de los alcalinizantes NaOH y NaHCO <sub>3</sub> con el agua clorada del río Cauca (ensayos de dosificación) .....          | 31 |
| 5.3.5 | Etapa VII: Sistematización y análisis estadístico de los resultados obtenidos para las variables monitoreadas en la etapa anterior .....        | 33 |

|       |                                                                                                                                                                                 |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6     | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                                                                                    | 37 |
| 6.1   | Componente 1: Identificación de los alcalinizantes de mayor aplicabilidad para el proceso de ajuste del pH del agua tratada del río Cauca (Etapa I y II de la metodología)..... | 37 |
| 6.2   | Componente 2: Evaluación a escala de laboratorio de los alcalinizantes NaOH y NaHCO <sub>3</sub> para el ajuste del pH del agua tratada del río Cauca.....                      | 48 |
| 6.2.1 | Etapa III y IV: Recopilación, sistematización y análisis estadístico de información histórica y de monitoreos .....                                                             | 48 |
| 6.2.2 | Etapa V, VI y VII: Evaluación de los alcalinizantes NaOH y NaHCO <sub>3</sub> con el agua clorada del río Cauca (ensayos de dosificación) .....                                 | 59 |
| 7     | CONCLUSIONES.....                                                                                                                                                               | 84 |
| 8     | RECOMENDACIONES .....                                                                                                                                                           | 86 |
| 9     | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....                                                                                                                                                 | 87 |
| 10    | ANEXOS .....                                                                                                                                                                    | 99 |

### LISTA DE TABLAS

|           |                                                                                                                                         |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 4.1 | Principales tecnologías para el tratamiento del agua para consumo humano .....                                                          | 14 |
| Tabla 5.1 | Detalles de las tuberías del SDA de Cali.....                                                                                           | 28 |
| Tabla 5.2 | Variables de monitoreo y métodos utilizados para su medición .....                                                                      | 30 |
| Tabla 5.3 | Concentraciones de soluciones alcalinizantes. ....                                                                                      | 31 |
| Tabla 5.4 | Pruebas de hipótesis entre concentraciones de un mismo alcalinizante .....                                                              | 34 |
| Tabla 5.5 | Pruebas de hipótesis entre Ensayos (Dosis 10 y 20 mg/L).....                                                                            | 34 |
| Tabla 6.1 | Características similares entre los alcalinizantes de mayor aplicabilidad.....                                                          | 38 |
| Tabla 6.2 | Características diferentes entre los alcalinizantes de mayor aplicabilidad. ....                                                        | 41 |
| Tabla 6.3 | Resumen estadístico (indicadores de tendencia central, de dispersión y de posición) para las variables del proceso de ajuste de pH..... | 49 |
| Tabla 6.4 | Características de las soluciones de NaOH y NaHCO <sub>3</sub> utilizadas en los ensayos de dosificación .....                          | 59 |

### LISTA DE FIGURAS

|            |                                                                                                                     |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.1 | Representación de la distribución de especies del Sistema Carbono.....                                              | 17 |
| Figura 5.1 | Ubicación general del estudio .....                                                                                 | 26 |
| Figura 5.2 | Esquema general de la PTAP de Puerto Mallarino .....                                                                | 27 |
| Figura 5.3 | Esquema de una jornada de monitoreo.....                                                                            | 31 |
| Figura 5.4 | Ensayos de dosificación para el Hidróxido de sodio y el Bicarbonato de sodio ..                                     | 32 |
| Figura 6.1 | Comportamiento de la Turbiedad del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos ..... | 50 |

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 6.2 Comportamiento del pH del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos .....                         | 51 |
| Figura 6.3 Comportamiento de la Alcalinidad Total del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos .....        | 52 |
| Figura 6.4 Comportamiento de la Dureza Total del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos .....             | 53 |
| Figura 6.5 Comportamiento del Calcio y la dureza cálcica del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos ..... | 54 |
| Figura 6.6 Comportamiento de los Cloruros del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos .....                | 55 |
| Figura 6.7 Comportamiento de los Sulfatos del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos .....                | 57 |
| Figura 6.8 Comportamiento de los Sulfatos del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos .....                | 58 |
| Figura 6.9 Comportamiento de la Temperatura del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos .....              | 58 |
| Figura 6.10 Correlación entre las dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y la turbiedad .....                                                       | 60 |
| Figura 6.11 Comparación de la turbiedad: Ensayos de dosificación-monitoreos-e históricos .....                                                | 61 |
| Figura 6.12 Correlación entre las dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y el pH del agua .....                                                     | 62 |
| Figura 6.13 Comparación del pH: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos .....                                                        | 63 |
| Figura 6.14 Correlación entre las dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y la alcalinidad total .....                                               | 64 |
| Figura 6.15 Comparación de la alcalinidad: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos .....                                             | 65 |
| Figura 6.16 Correlación entre las dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y la dureza total .....                                                    | 66 |
| Figura 6.17 Comparación de la dureza total: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos .....                                            | 67 |
| Figura 6.18 Correlación entre la dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y el Calcio .....                                                           | 68 |
| Figura 6.19 Comparación del calcio: Ensayos de dosificación - monitoreos-e históricos .....                                                   | 69 |
| Figura 6.20 Correlación entre la dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y Cloruros .....                                                            | 70 |
| Figura 6.21 Comparación de los cloruros: Ensayos de dosificación - monitoreos-e históricos .....                                              | 70 |
| Figura 6.22 Correlación entre las dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y Sulfatos .....                                                           | 72 |
| Figura 6.23 Comparación de los sulfatos: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos .....                                               | 72 |
| Figura 6.24 Correlación entre la dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y Sodio .....                                                               | 73 |
| Figura 6.25 Comparación del sodio: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos .....                                                     | 74 |
| Figura 6.26 Correlación entre las dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y la conductividad .....                                                   | 75 |
| Figura 6.27 Comparación de la conductividad: Ensayos de dosificación - monitoreos-e históricos .....                                          | 75 |
| Figura 6.28 Correlación entre la dosis de NaOH y $\text{NaHCO}_3$ y la temperatura .....                                                      | 76 |
| Figura 6.29 Comparación de la temperatura: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos .....                                             | 77 |
| Figura 6.30 Índices de Saturación de Langelier calculados para los ensayos de dosificación con NaOH y $\text{NaHCO}_3$ .....                  | 78 |

Figura 6.31 Relaciones alcalinidad/ $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$  calculadas para los ensayos de dosificación con NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  .....80

## LISTA DE ANEXOS

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Anexo 10.1 Datos de monitoreos hechos al agua tratada de la PTAP Puerto Mallarino .....                                                                               | 99  |
| Anexo 10.2 Datos obtenidos en los ensayos de dosificación con NaOH .....                                                                                              | 100 |
| Anexo 10.3 Datos obtenidos en los ensayos de dosificación con $\text{NaHCO}_3$ .....                                                                                  | 101 |
| Anexo 10.4 Datos de las réplicas de los ensayos de dosificación con NaOH y $\text{NaHCO}_3$ .....                                                                     | 102 |
| Anexo 10.5 Calcio calculado para los ensayos de dosificación con NaOH y $\text{NaHCO}_3$ .....                                                                        | 103 |
| Anexo 10.6 Resumen estadístico (indicadores de tendencia central, de dispersión y de posición) ensayos de dosificación.....                                           | 104 |
| Anexo 10.7 Cálculo de los ISL para los ensayos de dosificación .....                                                                                                  | 106 |
| Anexo 10.8 Prueba t-Student (contrastar concentraciones) para las distintas variables evaluadas .....                                                                 | 108 |
| Anexo 10.9 Prueba Mann-Whitney (contrastar concentraciones) para variables evaluadas.....                                                                             | 109 |
| Anexo 10.10 ANOVA de un solo factor para las distintas variables evaluadas. Comparación de los Ensayos. Dosis de 10 y 20 mg/L.....                                    | 110 |
| Anexo 10.11 Prueba Kruskal-Wallis para la turbiedad y el pH. Comparación de los Ensayos. Dosis de 10 y 20 mg/L .....                                                  | 110 |
| Anexo 10.12 ANOVA de un solo factor para el ISL y la relación Alcalinidad/ $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ . Comparación de los Ensayos. Dosis de 10 y 20 mg/L ..... | 110 |
| Anexo 10.13 Tukey al 5% para las variables con diferencias significativas del Anexo 10.10 y Anexo 10.11 .....                                                         | 111 |
| Anexo 10.14 Tukey al 5% para el ISL .....                                                                                                                             | 111 |
| Anexo 10.15 Validación de supuestos para las pruebas t-Student realizadas .....                                                                                       | 112 |
| Anexo 10.16 Validación de supuestos para los ANOVA realizados.....                                                                                                    | 115 |

## 1 INTRODUCCION

El suministro de agua potable es requisito indispensable para la vida y progreso de la humanidad. Este suministro requiere de fuentes inagotables de agua y sistemas complejos de almacenamiento, potabilización y distribución; es por lo tanto responsabilidad de los profesionales relacionados con este campo suministrar con calidad y cantidad suficiente agua para las necesidades de la población (Pérez, 2005). Uno de los aspectos importantes para que el sistema de distribución de agua funcione adecuadamente es la calidad de agua que producen las plantas de tratamiento de agua potable. El agua que entre en el Sistema de Distribución de Agua (SDA) debe ser inocua desde el punto de vista microbiológico y debe ser también estable en términos químicos y físicos (OMS, 2004), lo cual se logra mediante el tratamiento de ésta, donde el tratamiento convencional basado en procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y el ajuste del pH ha sido uno de los más utilizados a través de la historia (Penalva et al., 2013).

El ajuste del pH es el término aplicado al acondicionamiento químico del agua para reducir su capacidad disolvente y corrosiva, asegurando que no promueva la corrosión o la formación de incrustaciones en el SDA (Casey, 2009). En las plantas de tratamiento se requiere de este ajuste de pH debido a la utilización de productos químicos en procesos como la coagulación y la desinfección del agua que generan variaciones en los parámetros fisicoquímicos como el pH, alcalinidad y el contenido de iones de calcio, cloruros y sulfatos que influyen en la corrosividad y formación de incrustaciones en los SDA (GQ, 2006; Casey, 2009).

El sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de Cali suministra agua potable aproximadamente a 2.5 millones de personas, para lo cual se cuenta con cuatro fuentes superficiales (Ríos: Cauca, Cali, Meléndez y Pance), siendo el Río Cauca la principal fuente ya que abastece las Plantas de Potabilización de Agua de Puerto Mallarino y Río Cauca, las cuales suministran aproximadamente el 80% del total de agua potable producida por EMCALI EICE ESP. La red de distribución de la ciudad tiene una longitud total de aproximadamente 2.900 Km, lo que hace que para esta empresa de agua potable sea importante el control de corrosión e incrustación en su SDA (Universidad del Valle y EMCALI EICE ESP, 2007).

Uno de los métodos de control de la corrosión es el ajuste del pH del agua, el cual se presenta en este trabajo de grado para el agua tratada del Río cauca mediante el uso de dos alcalinizantes: Hidróxido de Sodio y Bicarbonato de sodio que fueron evaluados experimentalmente a escala de laboratorio en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Puerto Mallarino en la ciudad de Cali; para lo anterior se tuvo en cuenta la capacidad del agua para precipitar la película de  $\text{CaCO}_3$  en el SDA después de la adición de los alcalinizantes, por medio de la evaluación de las siguientes condiciones: valores de alcalinidad y contenido de Calcio, la relación alcalinidad/  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^-$  y el Índice de Saturación de Langelier (ISL) del agua, verificando siempre el cumplimiento de la normatividad colombiana para el agua potable (Resolución 2115 de 2007).

Este trabajo de grado fue realizado en el marco del proyecto de investigación: EVALUACION DEL PROCESO DE ESTABILIZACION DEL pH MEDIANTE LA APLICACIÓN DE INDICES Y ESTABILIZADORES EN EL AGUA TRATADA DEL RIO CAUCA, financiado por la Universidad del Valle.

## 2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

Una de las mayores preocupaciones para la humanidad ha sido el acceder a agua potable, por lo que se han ideado distintas técnicas para cumplir con este objetivo. A través de la historia se han presentado varios avances que han llevado hoy por hoy a la existencia de distintas tecnologías para potabilización, de las cuales, Galvis y Vargas (2004) mencionan que las de mayor potencial de aplicación en Colombia y en países de la región latinoamericana son la de ciclo completo, filtración directa, filtración en múltiples etapas, tecnologías con énfasis en remoción de hierro y manganeso, como también la combinación de tecnologías, teniendo en cuenta que en todos los casos se ven involucradas diferentes etapas orientadas a mejorar la calidad final del agua (Cheremisnoff, 2001).

De acuerdo con Cheremisnoff (2001), la selección de la tecnología y/o la combinación de éstas dependerá además de los costos de tratamiento, de la cantidad y naturaleza del agua a tratar, es decir, de las propiedades físicas y químicas que se desean eliminar del agua cruda y la calidad del efluente que se deba alcanzar; de tal manera que desde los puntos de vista de diseño y operacional las plantas de tratamiento varían pero todas se apoyan en una secuencia de operaciones y procesos. Estas operaciones pueden ser de carácter físico que incluyen la sedimentación y filtración; los procesos de carácter químico más representativos incluyen coagulación, desinfección y ajuste de pH.

Durante el proceso de coagulación la adición de químicos tiende a alterar la estabilidad del agua modificando el equilibrio calcio-carbónico (CQ, 2006) y ocasionando que el pH del agua se reduzca principalmente por la reacción entre el coagulante y la alcalinidad que trae el agua cruda (Lozano, 2006); por su parte, el proceso de desinfección comúnmente llevado a cabo por medio de la cloración (WHO, 2011), tiende también a reducir el pH a causa de los iones  $H^+$  que se generan (Trejo y García, 2007).

En función de esto, se requiere realizar el último proceso de acondicionamiento del agua el cual se logra mediante el ajuste del pH, la concentración de dióxido de carbono libre o la concentración de carbonatos ( $CaCO_3$ ) del agua a su equilibrio de saturación (Trujillo et al., 2003). Este proceso tiene como fin que el agua a la salida de la planta no confiera efectos corrosivos ni incrustantes en el sistema de distribución de agua (SDA) (Barrenechea, 2004), mediante la precipitación de una película fina de carbonato de calcio  $CaCO_3$  al interior de las tuberías. Esta película debe controlarse de tal manera que proteja pero no forme incrustaciones que reduzcan la capacidad del SDA (Schock, 2002).

En relación a lo anterior, un agua estabilizada no disuelve ni precipita  $CaCO_3$ , no remueve las incrustaciones de  $CaCO_3$  que puedan proteger a las tuberías contra la corrosión, ni precipita depósitos de  $CaCO_3$  que puedan obstruirlas (Trujillo et al., 2003). Al no favorecer las condiciones en el proceso de ajuste del pH, el agua podría disolver o precipitar los metales presentes en las tuberías (De Sousa et al., 2010). Dichos fenómenos, que están relacionados con las características fisicoquímicas del agua así como también del material que entra en contacto con el líquido, son de gran importancia para las empresas prestadoras del servicio de agua potable, ya que generan

consecuencias tales como el deterioro de la calidad del agua y el incremento de las pérdidas de carga y de agua en el SDA (Maddison et al., 2001).

Al presentarse incrustaciones en la superficie interna de las tuberías se ve perjudicado el rendimiento de éstas, ya que los sólidos insolubles formados se adhieren a la superficie con la que el agua entra en contacto y pueden reducir la capacidad de conducción del líquido (Casey, 2009), pueden conducir también a que se incrementen los costos de bombeo debido a la acumulación de depósitos en las líneas de distribución, así como en los filtros de grava y arena y en general en cualquier dispositivo que emplee agua o tanques de almacenamiento y algunas líneas pueden ser completamente bloqueadas, lo que implicaría su sustitución o una limpieza para su rehabilitación (Trujillo et al., 2003; GQ, 2006).

Por otra parte, la corrosión en un SDA tiende a incrementar la concentración de metales, algunos potencialmente tóxicos como el plomo y el cadmio, otros que tiñen y/o tienen sabor metálico como el cobre, hierro y zinc (Schock, 2002). Los productos de la corrosión que se encuentran adheridos a la superficie de los tubos o acumulados como sedimentos pueden proteger a los microorganismos de los desinfectantes, llevando a que éstos se reproduzcan formando biopelículas las cuales junto con los sedimentos tienden a desprenderse de las tuberías como consecuencia de cambios en las condiciones hidráulicas de la red y el aumento de los esfuerzos cortantes en las paredes de las tuberías, fenómenos que ocurren bien sea por mantenimiento de la red u otro tipo de evento. Lo anterior genera una variación notoria en las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua y por lo tanto problemas tales como mal sabor, olores, corrosión adicional y un cambio en el color del agua (fenómeno conocido como coloración), que son percibidos por los usuarios generando en estos desconfianza respecto a la calidad del líquido (Schock, 2002; Henao, 2009; Rueda et al., 2013).

Además de un problema de percepción, los fenómenos descritos anteriormente pueden llegar a afectar la salud de la población teniendo en cuenta que dentro de los SDA se encuentran cerca de 355 tipos de microorganismos, de los cuales gran parte son bacterias patógenas que representan un riesgo para la salud pública (Henao, 2009; Rueda et al., 2013); sumado a lo anterior, la acumulación de sedimentos dificulta el mantener una concentración residual de desinfectante en la red, implicando así un aumento en la demanda de este. También la corrosión puede poner en peligro la integridad estructural de los distintos componentes del Sistema de Abastecimiento de Agua Potable (SAAP), como los tanques utilizados en los procesos de tratamiento y almacenamiento, tuberías, accesorios y otras instalaciones, requiriendo la reposición de estos e incrementando el riesgo de intrusión de microorganismos patógenos (Maddison et al., 2001; Mora y Cedeño, 2006; Casey, 2009).

Lo anterior es de suma importancia para el SDA de la ciudad de Cali, ya que una de las problemáticas que se viene presentando los últimos años en ésta, tiene que ver con las constantes suspensiones del servicio de agua potable debido a la alta turbiedad, deterioro progresivo de la calidad de agua y contaminación por alta carga orgánica del río Cauca; sumado a lo anterior que cada día hay un promedio de 130 daños de acueducto que en algunos casos hace necesaria la reposición de tuberías (EMCALI, 2012); todo lo cual contribuye a cambios en las condiciones

hidráulicas de la red y a su vez a la resuspensión de sedimentos y biopelículas productos de la corrosión con los efectos mencionados previamente.

De acuerdo con lo anterior, los fenómenos de corrosión e incrustación son dos de las problemáticas a controlar de mayor importancia en la producción de agua potable, ya que éstos pueden llevar a problemas tanto de salud pública, aceptación del agua que es distribuida a la comunidad y el incremento de costos para proveer un agua apta para consumo humano. De acuerdo con De Sousa et al. (2010), una vez que se ha detectado la presencia de estos problemas en el SDA, su control requiere la elección de materiales adecuados, un buen programa de monitoreo y mantenimiento y la modificación de las características químicas del agua. Debido a que cada sistema tiene sus propias interacciones, el control a realizar deberá tratarse de manera individual para cada caso (GQ, 2006). Como parte del mantenimiento se recomienda la implementación de programas periódicos de limpieza de la red por medio de técnicas, entre las cuales el lavado hidráulico o “flushing”, en inglés, es el método más simple y menos costoso para el control del crecimiento y desprendimiento de la biopelícula y de acumulación de compuestos metálicos en las tuberías (Vreeburga y Boxall, 2007; Douterelo et al., 2014). Por otra parte, la modificación química del agua puede hacerse por medio del uso de inhibidores químicos (ortofosfatos, polifosfatos y silicatos) y el ajuste de pH (De Sousa et al., 2008).

El ajuste del pH representa uno de los métodos más comunes, simples y económicos para controlar la corrosión e incrustación, ya que además de ser de fácil aplicación, desde el punto de vista económico es de muy bajo costo comparado con los costos generados por la rehabilitación de las redes de distribución (De Sousa et al. 2010). Para el ajuste del pH existen varios productos como los alcalinizantes, tales como la cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), el Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ), Bicarbonato de sodio y Carbonato de Sodio ( $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) que promueven la formación de la película de  $\text{CaCO}_3$  en las superficies del SDA (Kim et al., 2008); para la disminución del pH el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) es uno de los ácidos típicamente usados (Birnhack et al., 2011). El uso de uno u otro producto, así como la efectividad que tenga una técnica de acondicionamiento del agua pueden variar ampliamente de una fuente a otra (Schock, 2002), debido a que todas las aguas presentan una química diferente y la determinación de la corrosividad e incrustabilidad es un factor imprescindible para poder diseñar el tratamiento adecuado del agua (Trujillo et al., 2003).

El río Cauca es la segunda arteria fluvial de Colombia, ya que un 25% de la población se ubica en su área de influencia, localizándose en su cuenca 183 municipios de los departamentos de Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar (IDEAM, 2001). Aproximadamente el 80% de la ciudad de Cali es abastecida por el río Cauca a través de dos plantas de tratamiento, la planta Rio Cauca y la planta de Puerto Mallarino, siendo esta última la de mayor capacidad de la ciudad (Smits et al., 2008).

De acuerdo con Torres et al. (2010), el agua cruda que llega a la bocatoma de Puerto Mallarino presenta valores promedio de alcalinidad de  $27.15 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ , lo cual sugiere que es un agua con tendencia corrosiva por ser este valor menor a  $50 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$  (Gray, 2008); adicionalmente, los procesos de coagulación y desinfección que se llevan a cabo en la PTAP tienden a consumir alcalinidad y disminuir el pH del agua, lo cual se agudiza en eventos picos de turbiedad que

generan un efecto directo sobre la dosificación de químicos (Montoya et al., 2011); por lo anterior, la PTAP utiliza  $\text{Ca(OH)}_2$  para el ajuste de pH del agua tratada que ingresa al SDA. Si bien el  $\text{Ca(OH)}_2$  incrementa el valor del pH, alcalinidad y dureza del agua, es un alcalinizante que tiende también a incrementar la turbiedad del agua tratada (Montoya et al., 2011), generando además depósitos en el equipo usado para el proceso de apagado de la cal y ocasionalmente taponando las tuberías para su dosificación, haciendo necesario implementar frecuentemente un mantenimiento intensivo sobre las unidades involucradas en dicho proceso (Lozano, 2006).

Adicional a lo anterior y aunque este alcalinizante aumenta el valor de parámetros tan importantes para el control de la corrosión como los mencionados previamente, -pH, alcalinidad y dureza-, dicho incremento no permite que estos cumplan con los valores recomendados para la formación de la película protectora de  $\text{CaCO}_3$ . De acuerdo con información histórica, (años 2011-2012), el agua cruda que ingresa a la PTAP tiene valores de pH cuya mediana es de 7,26 unidades, una alcalinidad total promedio de 30,72  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ , valor levemente superior al encontrado por Torres et al. (2010), y una dureza cálcica promedio de 30,71  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ; al comparar los valores anteriores con los históricos para el agua tratada, se evidencia el impacto de los químicos adicionados en el tren de tratamiento, ya que el pH presenta una mediana de 7,18 unidades, la alcalinidad total promedio es de 21,16  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$  y el promedio de dureza cálcica es de 37,77  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ; de manera tal que la adición de  $\text{Ca(OH)}_2$  en el proceso de ajuste de pH ayuda a incrementar estos parámetros después de que el agua ha pasado por el proceso de coagulación y desinfección, pero aun así son valores –a excepción de la dureza cálcica- en muchos casos inferiores a los que inicialmente tenía el agua cruda que ingresa a la PTAP y son muy bajos también respecto a los valores recomendados para un buen ajuste de pH del agua y el control de la corrosión en el SDA: pH igual o superior al pH de saturación (8,7 – 9,0 unidades); Alcalinidad > 40  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ; Dureza Cálcica > 40  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ .

Lo anterior indica que el actual proceso de ajuste de pH del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino no cumple plenamente con condiciones que faciliten la formación de la película protectora en el SDA, lo cual se ve reflejado con la formación de biopelículas y concentración de hierro y manganeso en las paredes de las tuberías de la red baja de la ciudad (Muñoz et al., 2007), además de los daños que se presentan en el SDA especialmente en las tuberías de asbesto cemento (PDA, 2008) posiblemente por las características del agua tratada, cuyo pH no alcanzan las 8,5 unidades recomendadas para este tipo de tubería; Por estas razones en este trabajo de grado se evaluaron dos alcalinizantes alternativos al  $\text{Ca(OH)}_2$ , teniendo en cuenta sus características y potencial de aplicación para promover las condiciones necesarias a la salida de la planta de potabilización para la formación de la película de  $\text{CaCO}_3$  en la red baja del SDA de la ciudad de Cali.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo General**

Evaluar el proceso de ajuste del pH para el agua tratada del río Cauca usando dos alcalinizantes.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Identificar los alcalinizantes de mayor aplicabilidad para el proceso de ajuste del pH del agua tratada del río Cauca producida por la PTAP Puerto Mallarino.
- Evaluar a escala de laboratorio dos alcalinizantes para el ajuste del pH del agua tratada del río Cauca producida por la PTAP Puerto Mallarino.

## 4 REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Procesos de Tratamiento

Existen muchos tipos de tratamiento para el agua superficial dentro de los cuales el más utilizado a través de la historia ha sido el tratamiento convencional, pero han surgido también otros tipos de tratamiento para fuentes de agua con pocas turbiedades, bajas concentraciones de Carbono Orgánico Total (COT) y bajos valores de color; para este tipo de calidad de agua se utilizan tratamientos como: Filtración sin clarificación previa por filtro lento en arenas, filtración directa y filtración por membrana (Penalva et al., 2013). A continuación se presenta la Tabla 4.1 con las tecnologías principales.

**Tabla 4.1** Principales tecnologías para el tratamiento del agua para consumo humano

| TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO |                                                                  |                                          |                                                                                                                                                       |                                     |                                   |                                   |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Filtración en múltiples etapas                         | Etapas de Pre-tratamiento<br><br>(Separación de Material Grueso) |                                          | Etapa principal de tratamiento<br>(Remoción Gradual de Materia fina y Microorganismos)<br><br>➤ FGD <sub>i</sub> +FLA<br>➤ FGD <sub>i</sub> +FGAC+FLA |                                     | Desinfección<br><br>Ajuste del pH |                                   |
|                                                        |                                                                  |                                          |                                                                                                                                                       |                                     |                                   |                                   |
| Filtración directa ascendente                          | Aplicación del coagulante                                        |                                          | Filtro rápido ascendente                                                                                                                              | Desinfección<br><br>Ajuste del pH   |                                   |                                   |
| Filtración directa descendente sin floculación         | Aplicación del coagulante                                        |                                          | Filtro rápido descendente                                                                                                                             | Desinfección<br><br>Ajuste del pH   |                                   |                                   |
| Tecnología de doble filtración                         | Aplicación del coagulante                                        |                                          | Filtro ascendente                                                                                                                                     | Filtro rápido descendente           |                                   | Desinfección<br><br>Ajuste del pH |
| Tratamiento Convencional                               | Etapas de Pre-tratamiento<br>(Separación de Material Grueso)     | Unidad de Mezcla rápida<br>(Coagulación) | Unidad de Mezcla Lenta<br>(Floculador)                                                                                                                | Unidad de sedimentación o flotación | Filtración Granular               | Desinfección<br><br>Ajuste del pH |
|                                                        |                                                                  |                                          |                                                                                                                                                       |                                     |                                   |                                   |

FGD<sub>i</sub>: Filtración Gruesa Dinámica; FGAC: Filtración Gruesa Ascendente en Capas; FLA: Filtración Lenta en Arena

**Fuente:** Adaptado de Penalva et al. (2013)

El tratamiento convencional está basado en procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y por último el ajuste del pH (Penalva et al., 2013). Este último proceso es importante ya que en los pasos anteriores se adicionan reactivos que muchas veces llevan a que se presente la alteración del equilibrio carbonato, por lo que es necesario llevar a cabo el proceso de ajuste para asegurar que el agua producida siempre esté balanceada y no sea agresiva para el SDA (Pecheux et al., 2001); de acuerdo con esto, cuando se trata el agua para hacerla apta para consumo humano, este tratamiento muchas veces incluye el proceso de coagulación y en todos los casos el proceso de desinfección, los cuales generalmente afectan de manera importante el pH del agua (Trejo y García, 2007).

La coagulación es un proceso químico para desestabilizar partículas coloidales presentes en el agua cruda, donde se agrega un producto químico llamado coagulante que aporta iones de carga positiva al agua que contiene coloides de carga negativa (Trejo y García, 2007). De acuerdo con AWWA (2002), los elementos claves en el proceso de coagulación son: la dosis de coagulante, la alcalinidad y el pH del agua cruda, las concentraciones de Materia Orgánica Natural (MON) y las especies del hidróxido metálico, incluyendo las características de superficie del precipitado y solubilidad. Con el proceso de coagulación se neutralizan las cargas eléctricas de los coloides presentes en el agua anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas (Lorenzo, 2006). En estas reacciones se produce un exceso de iones  $H^+$  que tienden a disminuir el pH del agua, los cuales tienden a ser neutralizados por la alcalinidad bicarbonática presente en el líquido (Trejo y García, 2007); en aquellos casos en los que el agua posea una baja alcalinidad será necesario el ajuste del pH por medio de la adición de una base (Matilainen et al., 2010).

La desinfección, por otro lado, consiste en la destrucción selectiva de los organismos que causan enfermedades hasta alcanzar una concentración inocua (Trejo y García, 2007; Colindres, 2010). Este proceso utiliza un agente físico o químico para destruir los microorganismos patógenos que pueden transmitir enfermedades utilizando el agua como vehículo pasivo. Como caso específico el cloro disminuye el pH debido a que el agente químico añadido se hidroliza casi por completo en el agua para disociarse luego en iones hidrogeno  $H^+$  (Trejo y García, 2007; JCYL, 2009; Birnhack et al., 2011), como se presenta en la siguiente reacción (De Sousa et al., 2010).



## 4.2 Ajuste del pH

El ajuste del pH es el término aplicado al acondicionamiento químico del agua para reducir su capacidad disolvente y corrosiva, asegurando también que no promueva la formación de incrustaciones en el SDA (Casey, 2009); GQ (2006) menciona que el ajuste del pH permite el control de la corrosión, ya que en la mayoría de los casos ésta no puede ser eliminada pero sí reducida a un nivel aceptable que no afecte a los consumidores ni a la vida útil del SDA. Este método que tiene como fin precipitar y mantener una película fina de Carbonato de Calcio ( $CaCO_3$ ) en el interior de las tuberías (CONAGUA, 2007; De Sousa et al., 2010), es el más común para la reducción de la corrosión en los SDA, ya que tiende a ser mucho más económico

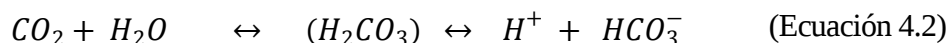
y fácil de llevar a cabo en comparación con los costos que implica la rehabilitación de las redes de distribución (De Sousa et al., 2010).

Típicamente cuando se estabiliza el agua, se proporciona suficiente capacidad buffer, de tal manera que resista cambios radicales en su pH y que tienda a precipitar  $\text{CaCO}_3$  en lugar de disolverlo (Lahav et al., 2009). De acuerdo con Schock (2002), la corrosión es el deterioro de un material o de sus propiedades debido a la reacción que tiene con su entorno, de tal manera que en la producción del agua para consumo humano, el “material” que se deteriora es la superficie interna del SDA y el “entorno” es el agua potable; la incrustación, por otra parte, se presenta cuando se precipitan sólidos insolubles que se aglomeran y se depositan en la superficie de los materiales (Trujillo et al., 2003).

Es fundamental conocer el comportamiento del sistema carbonato para la ingeniería del ajuste del pH del agua (Casey, 2009) debido a que éste constituye la base para entender los términos de alcalinidad e Índice de saturación de Langelier (ISL) (Birnhack et al., 2011). Las principales características de éste se presentan a continuación.

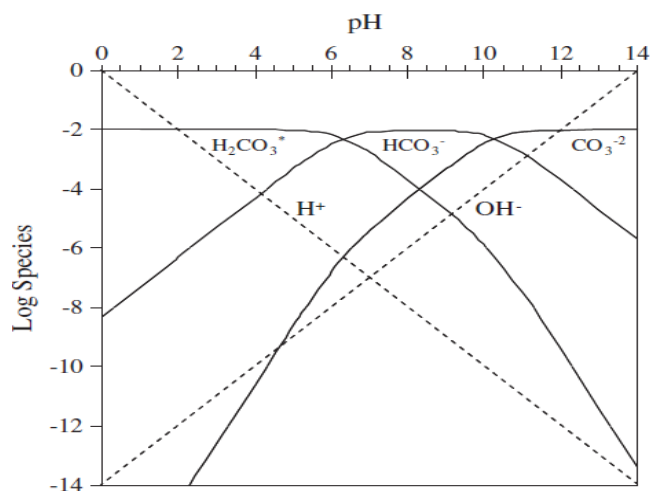
#### 4.2.1 Sistema carbonato

Las especies químicas que componen el sistema carbonato son el Dióxido de Carbono gaseoso ( $\text{CO}_{2(g)}$ ) o Dióxido de Carbono disuelto ( $\text{CO}_{2(ac)}$ ), el ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), el bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y el carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), además de sólidos que contienen carbonatos (Snoeyink y Jenkins, 2002). Este es el principal sistema ácido-débil presente en las aguas naturales (Birnhack et al., 2011), por ende, el pH de la mayoría de las aguas naturales se asume que es controlado por él y las reacciones de equilibrio aplicables son (Snoeyink y Jenkins, 2002):



La Figura 4.1 presenta la distribución de las especies del sistema carbonato como una función del pH, donde las concentraciones de  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  se muestran por medio de las líneas punteadas. De acuerdo con este diagrama, se observa que a valores de pH por debajo de 5,0 unidades la especie dominante es el  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , mientras que entre un pH de 7.5 – 9.5 unidades la especie que domina es el  $\text{HCO}_3^-$  (Birnhack et al., 2011).

Las especies del sistema carbonato afectan reacciones trascendentales en la química de la corrosión, entre ellas la habilidad del agua para formar una película protectora de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) que afecta la concentración de los iones de calcio (Schock, 2002); además, la adición de químicos que son usados en el proceso de coagulación tales como las sales trivalentes de Aluminio y de Hierro ( $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ ) y los productos usados para incrementar la alcalinidad del agua tales como la cal y el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  generan movimientos en el punto de equilibrio y en la distribución del sistema carbonato, alterando el pH del agua (Casey, 2009).



**Figura 4.1** Representación de la distribución de especies del Sistema Carbono  
**Fuente:** Birnhack et al. (2011)

La relación entre el pH y otros parámetros de la calidad del agua, tales como Carbono Inorgánico Disuelto (CID), Alcalinidad y Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) gobiernan la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  (De Sousa et al., 2010); estos se describen a continuación:

#### ❖ pH

El pH se define como la medida de la actividad de los iones de Hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) presentes en el agua (Schock, 2002); en la mayoría de las aguas potables, la actividad de estos iones es casi igual a su concentración. Este parámetro es considerado el principal factor que determina la solubilidad de la mayoría de los materiales de las tuberías y las películas que se forman de los productos secundarios de la corrosión (De Sousa et al., 2010).

De acuerdo con lo anterior, la mayoría de los materiales usados en los SDA se disuelven más rápido con un pH más bajo (De Sousa et al., 2010), además valores bajos de este parámetro impiden la formación de incrustaciones protectoras, presentándose una tendencia corrosiva (picaduras) en los materiales metálicos (De Sousa et al., 2008). Si se desea formar una película protectora, el pH del agua debe estar ligeramente por encima del pH de saturación (pHs) para el  $\text{CaCO}_3$ , teniendo en cuenta que el pH apropiado para cualquier sistema de distribución es específico de su calidad de agua y de los materiales del sistema (Schock, 2002), aunque por lo general un agua con un pH menor de 6,0 unidades es considerada agresiva y corrosiva para los metales (Barrenechea, 2004).

De lo mencionado anteriormente, se tiene que el efecto de este parámetro tiene que ver con el hecho de que los iones de hidrogeno ( $\text{H}^+$ ) actúan como aceptores de electrones que ceden los metales cuando se corroen, entrando rápidamente en las reacciones de corrosión electroquímicas (Schock, 2002; De Sousa et al., 2010), lo cual evidencia la importancia de su medición (Schock, 2002). Cuando la alcalinidad carbonatada está presente, si se incrementa el pH también se incrementa la cantidad de iones carbonato en solución, sin embargo, es importante tener cuidado

pues con la adición de demasiados carbonatos, el agua podría convertirse en un agua formadora de incrustaciones o podría ser difícil ajustar su pH (Schock, 2002).

### ❖ *Alcalinidad*

Según Schock (2002) y Barrenechea (2004), la alcalinidad se define como la capacidad del agua de neutralizar ácidos. Aniones de ácidos débiles como bicarbonatos, carbonatos, hidróxidos, sulfuros, bisulfuros, silicatos y fosfatos pueden llegar a contribuir a la alcalinidad. Por su parte Casey (2009) define la alcalinidad total ( $T_{Alc}$ ) por la siguiente suma de concentraciones molares como se muestra en la Ecuación 4.4, en la cual [ ] indica la concentración en mol/L y la alcalinidad total en equivalentes/L.

$$T_{Alc} = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [OH^-] - [H^+] \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Por lo general, la alcalinidad está presente en las aguas naturales como un equilibrio de carbonatos y bicarbonatos con el ácido carbónico, prevaleciendo los iones de bicarbonato. De ahí que un agua pueda tener baja alcalinidad y un pH relativamente alto o viceversa (Barrenechea, 2004). De acuerdo con esto, se debe tener en cuenta que el solo ajuste del pH suele ser insuficiente para controlar la corrosión en aguas que poseen baja alcalinidad debida a carbonatos y bicarbonatos (Schock, 2002).

### ❖ *Carbono Inorgánico Total (CIT)*

Es un término relacionado con el sistema carbonato debido a que corresponde a la suma de las concentraciones de las especies carbonatadas en el agua y puede definirse por medio de los dos parámetros anteriores: el pH y la alcalinidad (Casey, 2009). Cuando especies químicas como  $CaHCO_3^+$  y  $MgCO_3$  son mínimos, el valor de CIT está dado por la Ecuación 4.5 en la que [ ] indica la concentración en mol/L (Schock, 2002).

$$CIT = [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Es bueno tener en cuenta que ácidos fuertes y coagulantes trivalentes alteran la alcalinidad pero no cambian el valor del CIT del agua, mientras que los químicos usados para incrementar la alcalinidad alteran además de esta última, también el valor del CIT (Casey, 2009).

### ❖ *Dióxido de carbono ( $CO_2$ )*

De acuerdo con Casey (2009), la concentración del  $CO_2$  está dada en función del pH y la alcalinidad del agua, siendo determinada de manera aproximada por la Ecuación 4.6.

$$CO_2 \left( \frac{mg}{l} \right) = \frac{T_{Alc}}{10^{(pH-6.34)}} \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

En términos generales, los problemas de corrosión o incrustación de las aguas se deben principalmente a la concentración de este anhídrido carbónico libre. Las aguas pueden contener diferentes cantidades de  $CO_2$  libre que influye en el comportamiento del  $CaCO_3$ . Se dice que el

CO<sub>2</sub> de equilibrio es la cantidad de dióxido de carbono que debe estar presente en el agua para mantener en solución al bicarbonato que se encuentra en dicha agua (Sallanko et al., 2013). Si existe CO<sub>2</sub> en exceso, éste ataca al CaCO<sub>3</sub> para aumentar la concentración del bicarbonato y mantener el equilibrio; por otro lado, si hay deficiencia de CO<sub>2</sub>, el CaCO<sub>3</sub> se precipita para disminuir la concentración de bicarbonato, aumentando así el CO<sub>2</sub> y restableciendo el equilibrio (Trujillo et al., 2003; Sallanko et al., 2013).

De acuerdo con lo anterior, si el CO<sub>2</sub> libre es mayor que el CO<sub>2</sub> de equilibrio, existe exceso de CO<sub>2</sub> por lo que se considera que el agua es agresiva. Si el CO<sub>2</sub> libre es igual al de equilibrio, el agua está en equilibrio. Sin embargo, cuando el CO<sub>2</sub> libre es menor que el de equilibrio, existe deficiencia en el CO<sub>2</sub> de equilibrio y se dice que el agua es incrustante (Trujillo et al., 2003).

#### ❖ *Índice de saturación de Langelier (ISL)*

Para poder llevar a cabo un buen control de la corrosión en los SDA es importante caracterizar no solo cualitativa sino también cuantitativamente el agua, para lo cual se considera el uso de índices (Trujillo et al., 2008) dentro de los cuales el ISL ha sido el más utilizado (De Sousa et al., 2010).

El ISL es la medida cuantitativa de la tendencia del agua a precipitar o disolver CaCO<sub>3</sub>; está basado en el efecto del pH sobre el equilibrio de solubilidad del CaCO<sub>3</sub> y es utilizado comúnmente para la evaluación del ajuste del pH, ya que en función de su valor se deben agregar químicos para estabilizar el agua ajustando así su pH (De Sousa et al., 2010). De acuerdo con Schock (2002), se debe mantener un ISL positivo indicando que el agua se encuentra sobresaturada con CaCO<sub>3</sub>; entre más sea mantenido dicho valor, se puede asociar con una disminución de la tasa de corrosión (Birnback et al., 2011).

Teniendo en cuenta que el pH al cual el agua está saturada con CaCO<sub>3</sub> es conocido como pH de saturación (pH<sub>s</sub>), Langelier define el ISL igual a la diferencia entre el valor medido del pH del agua y el del pH de saturación, así (De Sousa et al., 2010):

$$ISL = pH - pH_s \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

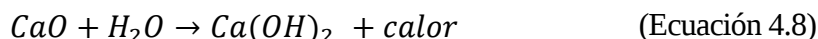
Es importante mencionar que si bien el ISL tiende a predecir si el CaCO<sub>3</sub> precipitará o se disolverá, siendo útil inicialmente para proporcionar las condiciones de sobresaturación en un SDA, éste no indica que cantidad de la sal precipitará o si su estructura proporcionará resistencia a la corrosión (De Sousa et al., 2010).

#### 4.2.2 Alcalinizantes

La capacidad de neutralización varía con los alcalinizantes que sean utilizados. Para el ajuste del pH se destaca el uso de Óxido de Calcio (CaO), hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) y Carbonato de Calcio (CaCO<sub>3</sub>) (Barrenechea, 2004; GQ, 2006). Estos se describen a continuación:

### ❖ *Óxido de calcio o cal viva – CaO*

El CaO producido en el proceso de calcinación para el ajuste de pH en las plantas de tratamiento, contiene entre 90-95% de CaO (Cotoruelo y Marqués, 1999) y tiende a ser un compuesto inestable en presencia de humedad y CO<sub>2</sub>. La reacción de este producto con el agua se presenta en la Ecuación 4.8 (Lozano, 2006):

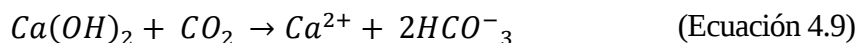


Cotoruelo y Marqués (1999), mencionan que la solubilidad de éste producto es de alrededor de 0.15g por cada 100g de agua a 30°C; su baja solubilidad lo hace de lenta reacción, aunque entre sus principales ventajas está su bajo costo y que se puede conseguir directamente en el mercado; sin embargo, este producto puede contener muchas impurezas que incrementan la turbiedad en el agua tratada (Di Bernardo & Sabogal, 2008).

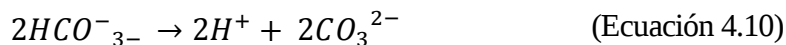
### ❖ *Hidróxido de calcio o cal hidratada – Ca(OH)<sub>2</sub>*

Este producto es una base fuerte comúnmente empleada, cuya efectividad se debe al tamaño reducido de las partículas hidratadas de cal que al ser agitadas en la solución acuosa permanecen en suspensión por un periodo relativamente prolongado y presentan un área superficial total alta; además, la ionización de la cal hidratada en una solución acuosa produce dos grupos hidroxilo que resultan de cada molécula de cal que se disocia en el agua, lo cual genera un efecto neutralizador (Lozano, 2006).

Autores como Manharawy y Hafez (2002) y Barrenechea (2004) mencionan que este químico puede ser añadido para incrementar la concentración de calcio y crear una condición apropiada para la precipitación de CaCO<sub>3</sub> en aguas suaves (Kim et al., 2008) que presentan una suma de cationes polivalentes, principalmente calcio y magnesio, menor de 100 mg/L expresados como la cantidad equivalente de carbonato de calcio. Al agregar 1 mol de Ca(OH)<sub>2</sub>, el agua incrementará su alcalinidad en 1 equivalente pero la concentración de CIT no se verá afectada (Birnhack et al., 2011). La reacción para este químico se presenta en la Ecuación 4.9, observándose que la producción de bicarbonato se da exclusivamente por la presencia de dióxido de carbono (Torres et al., 2008):



Al continuar con la adición de cal se forma el carbonato de calcio insoluble como se observa en la Ecuación 4.10 y Ecuación 4.11 (Torres et al., 2008):



Su extendido uso se debe principalmente a su bajo costo (Cotoruelo y Marqués, 1999; Labiod y Ghizellaoui, 2012) y facilidad de adquisición, pero requiere cuidado en su manejo debido a la

insolubilidad de algunas sales que se forman generando precipitados de  $\text{CaCO}_3$  e incrementando la turbiedad al final del tratamiento (Torres et al., 2008); además, se debe usar una cantidad sustancial para obtener resultados razonables, situación que resulta aún más desfavorable para el agua tratada (Kim et al., 2008). De acuerdo con Birnhack et al., (2011), en algunos casos para disolver eficientemente la cal, el agua debe acidificarse previamente por medio de la adición de  $\text{CO}_2$ . El  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  enriquece el agua con alcalinidad total pero no añade alcalinidad carbonatada, por lo tanto no contribuye a la capacidad buffer del sistema.

#### ❖ *Hidróxido de sodio o soda cáustica – NaOH*

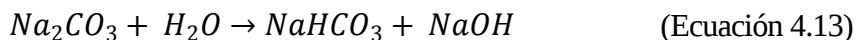
Este químico es una base fuerte que puede ser adicionada al agua para inducir niveles de pH y alcalinidad apropiados para la formación de una película de  $\text{CaCO}_3$  en la superficie del SDA (Kim et al., 2008). Como características del NaOH, Vargas et al. (2009) mencionan que este químico a temperatura ambiente es un sólido cristalino, blanco, sin olor y que absorbe rápidamente dióxido de carbono y humedad del aire. Según Casey (2009), el uso de NaOH al igual que el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es apropiado para aguas con baja alcalinidad, donde existe suficiente  $\text{CO}_2$  libre presente para generarla; la adición de 1 mol de NaOH incrementará la alcalinidad del sistema también en 1 equivalente (Birnhack et al., 2011). El consumo de  $\text{CO}_2$  por medio de este producto se observa en la Ecuación 4.12 (Torres et al., 2008; GQ, 2006).



Este producto, que se emplea generalmente como solución al 50% en peso (Vargas et al., 2009; GQ, 2006), tiene como aspecto positivo el hecho de que no forma sales insolubles neutralizando eficientemente los ácidos fuertes (Torres et al., 2008); su forma líquida es fácil de aplicar (Sallanko et al., 2013) aunque su uso debe hacerse cuidadosamente ya que una sobredosificación del producto ocasionaría un incremento súbito del pH por tratarse de una base fuerte (Torres et al., 2008). Bajo condiciones normales de operación, la soda caustica no se deteriora rápidamente durante su almacenaje y permite una operación estable y limpia (Manharawy y Hafez, 2002). También es importante tener en cuenta, que si bien el producto aumenta el pH del agua, no incrementa el grado de dureza en ésta (Sallanko et al., 2013).

#### ❖ *Carbonato de sodio – $\text{Na}_2\text{CO}_3$*

Es una sal inodora, de color blanco (Colindres, 2010), que tiene características de sustancia buffer en valores de pH cercanos a 6,8 unidades. Su uso es adecuado para llevar a cabo el ajuste de pH en aguas de muy baja alcalinidad, donde iones de carbonato deben ser adicionados para formar carbonatos insolubles (Schock, 2002). El  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  añadido al agua incrementa su alcalinidad total al introducir el ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), como se presenta en la Ecuación 4.13 (Kim et al., 2008). Al añadir 1 mol de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al agua se incrementa la alcalinidad en 2 equivalentes y en 1 mol de CIT (Birnhack et al., 2011).

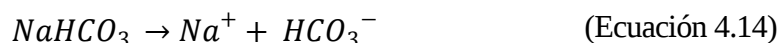


El  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  tiene una solubilidad de 71-100g/L a 20°C en el agua (Colindres, 2010), siendo considerada como bastante baja (Barrenechea, 2004). Su uso es simple (GQ, 2006) y según

Cotoruelo y Marqués (1999) y Hilleboe (2006), aunque el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  es más costoso que la cal, es muy activo, tiene eficacia aceptable y no causa dureza en el agua tratada; de hecho su uso resulta adecuado para suplir de carbonatos aguas con una alta dureza cálcica (Manharawy y Hafez, 2002).

#### ❖ *Bicarbonato de sodio – $\text{NaHCO}_3$*

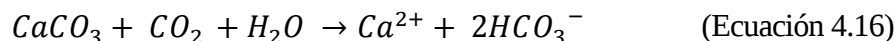
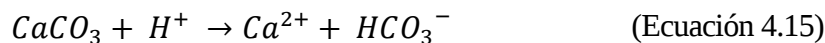
El  $\text{NaHCO}_3$  por otro lado, es una sal formada por una base fuerte ( $\text{NaOH}$ ) y un ácido débil ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), presentando así características de sustancia buffer (Torres et al., 2008); se encuentra en forma de polvo, cuya masa volumétrica varía entre 800 y 1.200  $\text{kg/m}^3$  y su solubilidad es bastante baja (96 g/L a 20 °C) (Barrenechea, 2004; GQ, 2006). Es útil para aumentar tanto la alcalinidad como el pH del agua (GQ, 2006). Es posible que se deba usar en combinación con pequeñas cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o  $\text{NaOH}$  (Casey, 2009). El  $\text{NaHCO}_3$  se disocia en el agua de acuerdo con la Ecuación 4.14 (Kim et al., 2008), teniendo en cuenta que por la adición de 1 mol de éste producto incrementa la alcalinidad y el valor del CIT en 1 equivalente (Birnhack et al., 2011).



Presenta como ventaja su fácil manipulación y debe tenerse en cuenta que no reacciona con el  $\text{CO}_2$  (Torres et al., 2008); GQ (2006) recomienda su uso para pequeñas instalaciones o cuando la dosificación de la cal está generando problemas.

#### ❖ *Carbonato de calcio – $\text{CaCO}_3$*

El  $\text{CaCO}_3$  es uno de los minerales de ocurrencia natural más abundantes en la tierra (Lozano, 2006); es un producto poco soluble, que se disuelve muy lentamente en el agua consumiendo iones hidrógeno y reaccionando con el  $\text{CO}_2$ , como se observa en la Ecuación 4.15 y Ecuación 4.16 (Stumm y Morgan, 1996).



A diferencia de productos como el  $\text{NaOH}$ , el  $\text{CaCO}_3$  al ser usado en el proceso de ajuste de pH además de incrementar el pH del agua también incrementa la dureza de esta. Aunque es un producto con una solubilidad muy baja, de alrededor de 0.0014g por cada gramo de agua a una temperatura de 25°C (Cotoruelo y Marqués, 1999) llevándolo a que sea de reacción lenta, tiene como aspecto positivo su bajo costo (Cotoruelo y Marqués, 1999) y el hecho de que no es posible una sobredosis con este producto, debido a que el pH de equilibrio cuando se usa este químico raramente sobrepasa las 8.5 unidades (Sallanko et al., 2013).

#### 4.2.3 Experiencias en el uso de alcalinizantes

El uso de los alcalinizantes para modificar la calidad del agua, generar y mantener una película protectora en el SDA y controlar así la corrosión en estos, es una estrategia que ha sido materia de investigación. A continuación se citan algunas experiencias:

Maddison et al. (2001), evaluaron distintas estrategias para el control de la corrosión en el SDA regional de Halifax – Canadá, las cuales consistieron en el ajuste del pH por medio de la adición de cal, NaOH y finalmente un polifosfato de zinc. El estudio se realizó para un agua con valores de alcalinidad menores a 5 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  y con un pH de alrededor de 5.5 unidades. La evaluación se llevó a cabo tanto con un sistema a escala piloto como a escala real. En general se logró un ajuste del pH (8.5 unidades) por los tres métodos empleados; se encontró además que la adición de cal incrementaba significativamente los niveles de turbiedad en el agua post-filtrada, lo que podría significar una deposición excesiva de material insoluble en el SDA; pese a esto se encontraron menos concentraciones de Hierro en el sistema cuando éste fue evaluado con la cal en comparación con las concentraciones de Hierro encontradas para el agua evaluada con NaOH. Se definió el polifosfato como la estrategia preferida para el control de la corrosión, seguida por el ajuste de pH por medio de NaOH y finalmente el ajuste con cal.

Lozano (2006) evaluó en la Planta de Tratamiento de Puerto Mallarino en Cali - Colombia, por medio de ensayos de laboratorio, el efecto que tuvo en la turbiedad el ajuste del pH por medio  $\text{Ca(OH)}_2$  en forma de suspensión –usualmente empleada en la planta- y en forma de solución saturada, en el agua filtrada de la planta. El pH se ajustó a valores de 7.0, 7.5, 8.0 y 9.0 unidades. Al aplicar las distintas dosis se pudo observar el aumento de la turbiedad del agua potable con un incremento en el pH y consecuentemente en la dosis de la cal aplicada para el agua alcalinizada con solución saturada y suspensión de cal; se observó también que mientras el aumento de turbiedad para el agua alcalinizada con solución saturada de cal no fue significativo, sí lo fue para el agua ajustada químicamente con suspensión de cal, sobre todo para los pH entre 7.4 a 9.0 unidades, cuyo rango es aquel que se emplea en la PTAP para el ajuste del pH del agua.

Tang et al. (2006) estudiaron los impactos de la mezcla de agua subterránea, superficial y salina en la liberación de plomo en un SDA, en Seoul - Corea del Sur. El estudio que fue llevado a cabo a escala piloto durante un año, permitió demostrar que la liberación de plomo en el SDA aumentaba con el incremento de cloruros, mientras que el calcio inhibía la liberación de dicha sustancia. Se comprobó también que la liberación de plomo disminuía con el incremento del pH y la alcalinidad del agua. Para ajustar estos parámetros los autores emplearon  $\text{NaHCO}_3$  y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Se concluyó que con valores de pH y alcalinidad superiores a 7,9 unidades y 70 mg $\text{CaCO}_3$ /L respectivamente se lograba la disminución de la concentración de plomo en el agua.

Colindres (2010) llevó a cabo una evaluación del sistema de potabilización en la Escuela Agrícola Panamericana, en el departamento de Francisco Morazán - Honduras, cuyo sistema consiste de un proceso de alcalinización para ajustar el pH y un proceso de desinfección del agua que es distribuida posteriormente. Se encontró que el proceso de ajuste de pH utilizado en el sistema era ineficiente en alcanzar un pH neutro para el agua cruda de la comunidad. Debido a lo

anterior, se hicieron pruebas de dosificación para dos tipos de alcalinizantes: el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y el  $\text{CaCO}_3$ , las cuales generaron resultados muy similares en cuanto a dosis requeridas para ambos productos siendo éstas de 30 mg/L y 33 mg/L, respectivamente, para alcanzar el pH mínimo establecido por la norma técnica de Honduras de 6.5 unidades; esto a partir de un agua cruda con un pH de alrededor de 4.4 unidades. Al final, por razones económicas, se definió el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  como la opción más favorable.

En Cheney - Whashington, Esvelt (2010) estudió la viabilidad para implementar  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o  $\text{NaOH}$  para ajustar el pH del agua en estudio, de modo que permitiese alcanzar valores positivos del ISL y así controlar la corrosión en el SDA de la universidad “Eastern Washington University”; para esto evaluó las características del agua, lo cual le permitió definir que ésta presentaba niveles de calcio y alcalinidad moderados y un pH neutro que la hacía ligeramente corrosiva. Al evaluar las ventajas y desventajas de ambos alcalinizantes concluyó que era más favorable la implementación del  $\text{NaOH}$ , ya que si bien el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ofrece una ventaja en cuanto al costo del químico como tal, sus costos operacionales serían más elevados debido a los requerimientos extra en cuanto a manejo y seguridad asociados. El  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  requiere trabajo adicional para mantener en funcionamiento las tuberías y equipos del sistema ya que tiende a taponar válvulas y depositarse en tuberías y tanques; adicionalmente, el equipo de dosificación de este alcalinizante generalmente demanda mucha atención y limpieza, teniendo una vida útil limitada por las mismas razones.

Booth (2011) presentó una estrategia para el control de la corrosión para la Planta de Tratamiento de Agua Regional de Longview - Estados Unidos; se tenían inicialmente como alternativas para el ajuste del pH del agua las siguientes:  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$ . Se seleccionó el  $\text{NaOH}$  sobre los demás alcalinizantes teniendo como argumento el hecho de que este puede ser adquirido en forma de solución y su aplicación para aguas subterráneas (como era este el caso) ha sido ampliamente conocida. Se evaluó entonces el  $\text{NaOH}$  encontrándose que a una dosis de 8 mg/L se alcanzaba el pH de 7,6 unidades (valor establecido como pH objetivo) y un agua más estable respecto al carbonato de calcio ya que se obtuvieron valores satisfactorios para el ISL (+0,61) y la relación alcalinidad/ $(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$  (18,2), recomendándose este como el único químico para controlar la corrosión del SDA del sitio en mención.

Enríquez (2012) en el departamento de Francisco Morazán - Honduras, llevó a cabo la evaluación de la eficiencia del tratamiento de ajuste de pH y el control de los metales en el sistema de potabilización de la Escuela Agrícola Panamericana; para esto se realizaron ensayos de dosificación con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en el agua cruda para determinar las dosis óptimas que elevaran el pH a valores de 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, y 8.5 unidades. Para alcanzar un pH de 6.5 unidades, -el mínimo exigido en la norma Hondureña-, se llegó a un requerimiento de dosificación de 43.9mg/L a partir de un agua con un pH inicial ácido de 3.9 unidades. Se concluyó que aunque el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  fue eficiente en elevar el pH en las muestras analizadas, fue poco eficiente en la regulación de concentraciones de Hierro y Aluminio en el sistema.

A nivel nacional, Rendón et al. (2012) llevaron a cabo un estudio llamado “Sistema para ajuste de pH en Precal y Poscal en las plantas de tratamiento de la empresa Aguas y Aguas de Pereira” con el fin de ajustar la alcalinidad y el pH del agua cruda y tratada en las diferentes etapas del proceso

de tratamiento de agua potable. Con la finalidad de elegir el alcalinizante a utilizar y las concentraciones requeridas, se realizaron ensayos de jarras con tres alcalinizantes:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y se hizo el control de parámetros como pH, alcalinidad, turbiedad y color. Los ensayos permitieron seleccionar el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como producto alcalinizante. Aunque los ensayos con este químico mostraron que la turbiedad y el color residual aumentaban a medida que las dosis se hacían mayores, este presentó un excelente rendimiento además de un costo razonable para la planta de tratamiento. El estudio arrojó como resultado que el rango óptimo para la solución madre del Hidróxido de Calcio debía estar entre 1.0 % y 3.0%, valores por debajo de este rango de concentraciones no aportaban el contenido necesario de componente activo para el ajuste de pH y las concentraciones mayores al 3.0%, excedían la solubilidad del producto.

Liang et al. (2013) investigó el efecto que tenían distintos tratamientos en el control de la corrosión en tuberías de hierro dúctil, hierro fundido y tuberías de hierro dúctil revestidas de cemento. Entre los tratamientos empleados estaban el  $\text{NaHCO}_3$  en combinación con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{CO}_2$  con el cual se aumentó el pH del agua desde 7,25 unidades a 8,0 unidades, se incrementó la alcalinidad y la dureza hasta un valor de  $100\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ; otro de los tratamientos fue el  $\text{NaHCO}_3$  con  $\text{CO}_2$  llegando a un pH de 8,0 unidades y una alcalinidad de  $100\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ , finalmente la sola adición de  $\text{NaOH}$  se empleó para ajustar el pH también a 8,0 unidades. Se determinó que el tratamiento  $\text{NaHCO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2$  mostró las tasas de corrosión más bajas para todos los tipos de materiales y que las tuberías de hierro dúctil revestidas de cemento resultaron más resistentes a los agentes de la corrosión en comparación con los otros dos materiales de tubería.

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Descripción general

#### 5.1.1 Localización del estudio

Este estudio se llevó a cabo en la Planta de tratamiento de Agua Potable Puerto Mallarino donde se tratan las aguas del río Cauca, abasteciendo alrededor del 60% de la población de la ciudad de Cali (Jiménez y Soto, 2014). La Figura 5.1 muestra la ubicación general donde se realizó el estudio.

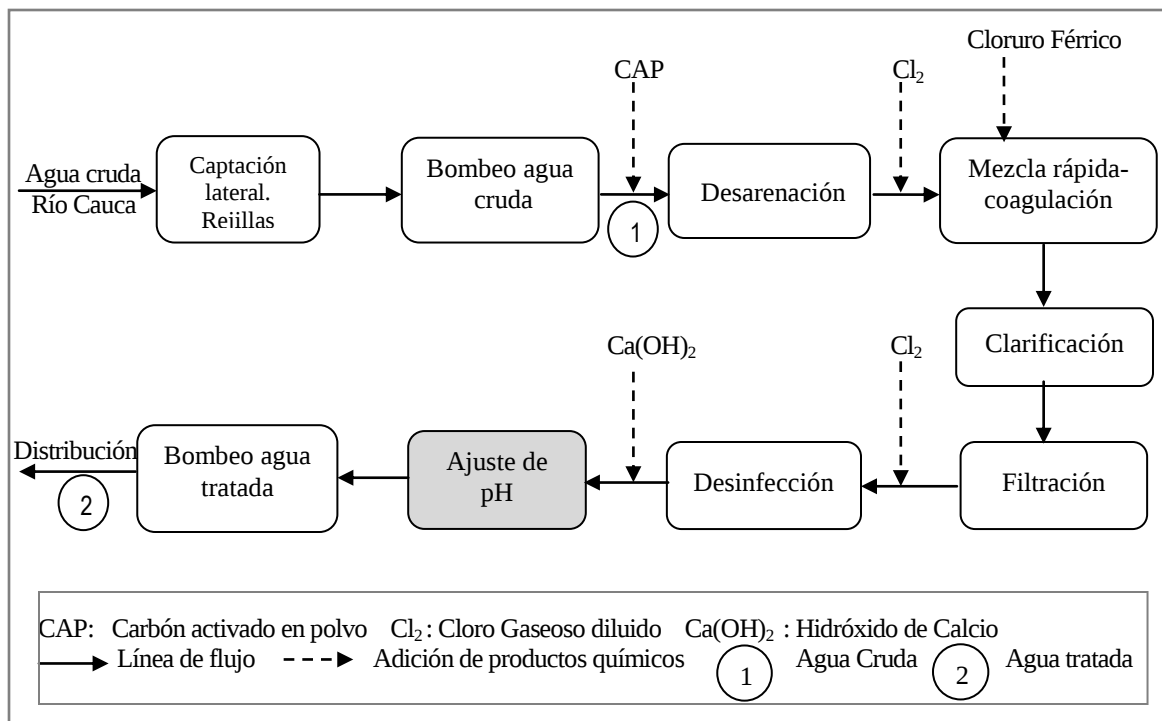


**Figura 5.1** Ubicación general del estudio

#### 5.1.2 Descripción general de la PTAP Puerto Mallarino

La PTAP Puerto Mallarino cuenta con una capacidad nominal de  $6,6 \text{ m}^3/\text{s}$  y una producción promedio de  $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$  (EMCALI., 2012); se encuentra ubicada al nororiente de la ciudad de Cali, en el barrio Andrés Sanín (Jiménez y Soto, 2014).

Esta PTAP fue diseñada y construida como un sistema de unidades de ciclo completo para el tratamiento del agua (Jiménez y Soto, 2014), cuyo tren de tratamiento lleva a cabo los procesos y operaciones unitarias que se presentan en la Figura 5.2. La PTAP cuenta además con un reservorio que fue construido con el fin de garantizar la continuidad del servicio de agua potable a los usuarios, buscando una solución al problema que se presentaba en la ciudad originado por la continua suspensión del servicio a cerca del 80% de los clientes (EMCALI, 2012).



**Figura 5.2** Esquema general de la PTAP de Puerto Mallarino

**Fuente:** Adaptado de Arjona et al. (2012)

Respecto al reservorio, este entró en operación desde octubre del 2009 y tiene una capacidad de  $80.000 \text{ m}^3$ ; almacena agua sedimentada (preclorada) que posteriormente alimenta las unidades de la planta de tratamiento de agua Puerto Mallarino y es operado en eventos de elevada carga contaminante o combinado con agua cruda en eventos de elevada turbiedad, sirviendo como medida de control del riesgo sanitario (Escobar et al, 2010) y permite así reducir el impacto de las paradas en la captación por deterioro del río Cauca sosteniendo el bombeo a la Red Baja entre 3 y 4 horas con algunas restricciones de caudal y presión, manteniendo con estas condiciones la continuidad del servicio (EMCALI, 2012; León et al., 2014). Adicionalmente, se está llevando cabo la construcción de un segundo reservorio, el cual contará con una capacidad de  $100.000 \text{ m}^3$ .

### 5.1.3 Descripción general de la fuente de abastecimiento

La fuente de abastecimiento de la PTAP Puerto Mallarino es el río Cauca, el cual siendo uno de los ríos más importantes de Colombia es también uno de los mayores receptores de contaminantes. De acuerdo con la investigación realizada por Torres et al. (2010) en el tramo Salvajina-bocatoma de la PTAP Puerto Mallarino, el río presenta una calidad entre regular y mala; el río muestra su deterioro a medida que avanza en su recorrido incrementándose los niveles de patógenos y material particulado debido a la presencia de descargas de origen doméstico y agropecuario. A partir de la estación paso de la balsa hasta la bocatoma de la PTAP Puerto Mallarino, el agua cruda del río Cauca presentó valores característicos de aguas superficiales con mayor deterioro en su calidad asociados principalmente al incremento en las

actividades agrícolas, industriales y urbanas en este sector y al manejo inadecuado de las fuentes tributarias, que además de problemas de contaminación por actividades antrópicas, presentan procesos erosivos.

De acuerdo con lo anterior, las características fisicoquímicas actuales del agua del río Cauca hacen que sea difícil su tratamiento, especialmente cuando se presentan picos de turbiedad que superan la capacidad máxima de la planta (reportes históricos mayores a 3000 UNT) o picos de materia orgánica (Oxígeno disuelto  $< 2.5 \text{ mgO}_2/\text{L}$ ) que obligan a parar la producción de agua potable y por ende a suspensiones del servicio, que aun con la operación del reservorio siguen presentándose (León et al., 2014).

#### 5.1.4 Descripción general del SDA

El SDA de EMCALI está dividido en 4 redes (Baja, Alta, Reforma y La Rivera), 41 tanques de almacenamiento y 16 estaciones de bombeo para la impulsión del agua hacia las partes más elevadas y lejanas de la ciudad; tiene como áreas de cobertura las cabeceras municipales de las ciudades de Santiago de Cali y Yumbo y pequeños sectores de corregimientos de los municipios de Candelaria y Palmira. Está conformado por aproximadamente 2.900 km de redes con diámetros entre 3" y 56" de las cuales el 86.93 % corresponde a redes secundarias (menores de 8") (EMCALI, 2012).

El SDA de la ciudad Santiago de Cali está conformado por tuberías de materiales y edades que se presentan en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1** Detalles de las tuberías del SDA de Cali

| MATERIAL                                        | %     | EDAD PROMEDIO (años) |
|-------------------------------------------------|-------|----------------------|
| Policloruro de Vinilo (PVC)                     | 52,80 | 14,5                 |
| Asbesto Cemento (AC)                            | 30,74 | 38                   |
| Hierro Fundido (HF)                             | 9,55  | 60                   |
| Hierro Dúctil (HD)                              | 2,01  | 8,5                  |
| Hierro Galvanizado (HG)                         | 0,09  | 43,5                 |
| Cilindros de acero revestidos en concreto (CCP) | 2,22  | 26                   |
| Acero                                           | 1,11  | 27                   |
| Polietileno de Alta Densidad (PAD)              | 1,47  | 7                    |

**Fuente:** Adaptado de EMCALI (2013).

Para cumplir con los objetivos propuestos se implementó una metodología que comprende 7 etapas, las cuales están distribuidas en los siguientes dos componentes:

- ❖ Componente 1: Identificación de los alcalinizantes de mayor aplicabilidad para el proceso de ajuste del pH del agua tratada del río Cauca producida por la PTAP Puerto Mallarino.
- ❖ Componente 2: Evaluación a escala de laboratorio de dos alcalinizantes para el ajuste del pH del agua tratada del río Cauca producida por la PTAP Puerto Mallarino.

## **5.2 Componente 1: Identificación de los alcalinizantes de mayor aplicabilidad para el proceso de ajuste del pH del agua tratada del río Cauca producida por la PTAP Puerto Mallarino**

Este componente está comprendido por las siguientes etapas:

### **5.2.1 Etapa I: Comparación de los principales alcalinizantes utilizados en el proceso de ajuste del pH**

Se llevó a cabo una revisión del material bibliográfico como libros, artículos, tesis y publicaciones (artículos) impresos y electrónicos de institutos y grupos de investigación, permitiendo construir el estado del arte orientado a la teoría del proceso de ajuste del pH, principales alcalinizantes, ventajas, limitaciones y experiencias de sus usos. Esta revisión bibliográfica permitió identificar el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{NaOH}$ , como los alcalinizantes más empleados para el ajuste del pH de agua en las PTAP.

### **5.2.2 Etapa II: Análisis de los alcalinizantes de mayor aplicación en el proceso de ajuste del pH**

Con la literatura revisada en la actividad anterior se realizó un análisis comparativo de los alcalinizantes encontrados; para esto se construyó una tabla comparativa en la cual los alcalinizantes se contrastaron de acuerdo con distintas características, de las cuales se identificaron algunas como presentación del producto, facilidad de adquisición, contenido activo, almacenamiento y equipos para dosificación que no diferían mucho de un alcalinizante a otro; mientras que otras características como solubilidad, riesgo de manejo, costo, aporte de cationes, alcalinidad y capacidad buffer al agua, efecto sobre el pH, operación y mantenimiento, reflejaron diferencias más notables entre los distintos alcalinizantes.

## **5.3 Componente 2: Evaluación a escala de laboratorio de dos alcalinizantes para el ajuste del pH del agua tratada del río Cauca producida por la PTAP Puerto Mallarino**

En este componente se llevaron a cabo las siguientes etapas:

### **5.3.1 Etapa III: Recopilación, sistematización y análisis estadístico de información histórica**

En esta actividad se procedió inicialmente a la recopilación de información histórica registrada respecto a la calidad del agua tratada del río Cauca por la PTAP Puerto Mallarino en el periodo 2011-2012; esta información se sistematizó y procesó llevando a cabo un análisis estadístico descriptivo que implicó el uso de medidas de tendencia central (mediana y promedio), de dispersión (desviación estándar), así como de distribución (diagramas de cajas y alambres), siendo ejecutado en el software Minitab 16®, de tal manera que fue posible observar el comportamiento histórico de las variables: turbiedad, pH, Alcalinidad total, dureza total y cálcica, calcio, cloruros, sulfatos, conductividad y temperatura; las cuales de acuerdo con autores como Schock (2002), EPA (2004), Kim et al. (2008), De Sousa et al. (2010), son variables claves a evaluar en el proceso de ajuste del pH del agua.

### 5.3.2 Etapa IV: Monitoreos del agua tratada

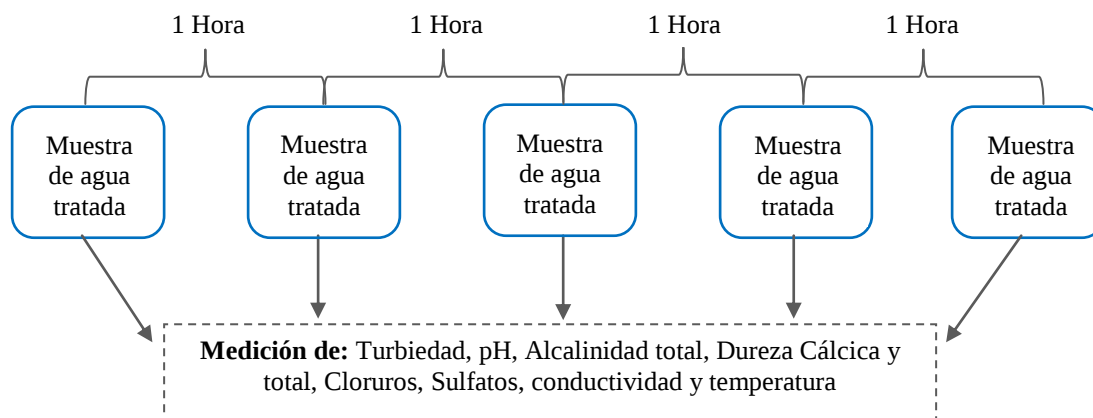
Se llevaron a cabo 6 jornadas de monitoreo durante 1 mes con el fin de evaluar el proceso de ajuste del pH en las condiciones actuales del agua tratada; en cada jornada se llevaron a cabo 5 mediciones por hora. Para cada medición se recolectó una muestra puntual de agua tratada de la PTAP Puerto Mallarino y a ésta posteriormente se le midieron las variables analizadas en la actividad anterior (turbiedad, pH, Alcalinidad total, dureza total y cálcica, calcio, cloruros, sulfatos, conductividad y temperatura) utilizando las metodologías sugeridas por APHA et al. (2005), las cuales se presentan en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2** Variables de monitoreo y métodos utilizados para su medición

| VARIABLE                                      | MÉTODO DE MEDICIÓN*                  |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| Turbiedad (UNT)                               | 2130 B                               |
| pH (Unidades)                                 | 4500-H <sup>+</sup> B                |
| Alcalinidad total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)   | 2320 B                               |
| Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)        | 2340 C                               |
| Dureza Cálcica (mg CaCO <sub>3</sub> /L)      |                                      |
| Calcio                                        | 3500-Ca D                            |
| Cloruros (mgCl <sup>-</sup> /L)               | 4500-Cl <sup>-</sup> B               |
| Sulfatos (mgSO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /L) | 4500-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> E |
| Conductividad (uS/cm)                         | 2510 B                               |
| Temperatura (°C)                              | 2550 B                               |

\*APHA et al. (2005)

De acuerdo con lo anterior, por cada jornada de monitoreo se recolectaron cinco muestras de agua tratada como lo presenta la Figura 5.3, para un total de 30 muestras durante el período de monitoreo, equivalente a las 6 jornadas mencionadas. Para el manejo de los datos obtenidos en esta etapa se empleó el mismo análisis estadístico descriptivo que en la etapa previa.



**Figura 5.3** Esquema de una jornada de monitoreo

### 5.3.3 Etapa V: Determinación de la concentración de aplicación para los alcalinizantes NaOH y NaHCO<sub>3</sub>

De acuerdo con la comparación teórica realizada en la etapa I y II de este estudio, se definieron el Hidróxido de Sodio (NaOH) y el Bicarbonato de Sodio (NaHCO<sub>3</sub>) como los alcalinizantes a evaluar. Las concentraciones de aplicación para estos dos alcalinizantes se eligieron teniendo en cuenta la revisión bibliográfica; dichas concentraciones varían entre 1 – 4% para el hidróxido de sodio y el bicarbonato de sodio, como se presenta en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3** Concentraciones de soluciones alcalinizantes

|                                  | ALCALINIZANTE |                    | Referencias bibliográficas                                                            |
|----------------------------------|---------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  | NaOH          | NaHCO <sub>3</sub> |                                                                                       |
| Concentraciones recomendadas (%) | 4             | 4                  | Pechoux et al. (2001); Zhan et al. (2012); Noel et al. (2014); Rahman y Gagnon (2013) |
|                                  | 2.4           | 3.0                | Rahman y Gagnon (2013); Churchill (1997)                                              |
|                                  | 2.0           | -                  | Manharawy & Hafez, (2002)                                                             |
|                                  | 1.85          | 1                  | Vargas et al. (2009); Liu et al. (2013); McClintock (2013); Noel et al. (2014)        |
|                                  | 1.0           | -                  | Sánchez et al. (2010)                                                                 |
| Rango                            | 1-4           | 1-4                | --                                                                                    |

De acuerdo con lo presentado en la tabla anterior, se definió trabajar con los valores extremos de los rangos recomendados eligiéndose así concentraciones de aplicación de 1% y 4% para ambos alcalinizantes, de manera tal que puedan evaluarse las diferencias entre estas y las ventajas y desventajas que pueda ofrecer la aplicación de los alcalinizantes a la concentración máxima y mínima recomendada.

Para la preparación de las soluciones de alcalinizantes (1% y 4%), se preparó una solución madre del 20% con agua tratada. La preparación de las soluciones se llevó a cabo en equipos de jar-test, a un volumen de agua de 1L y con condiciones de mezcla de 300 RPM durante 1 minuto (Rendón et al., 2012). Para cada ensayo se caracterizaron las variables pH y alcalinidad total de acuerdo con la metodología del APHA et al. (2005) (Tabla 5.2).

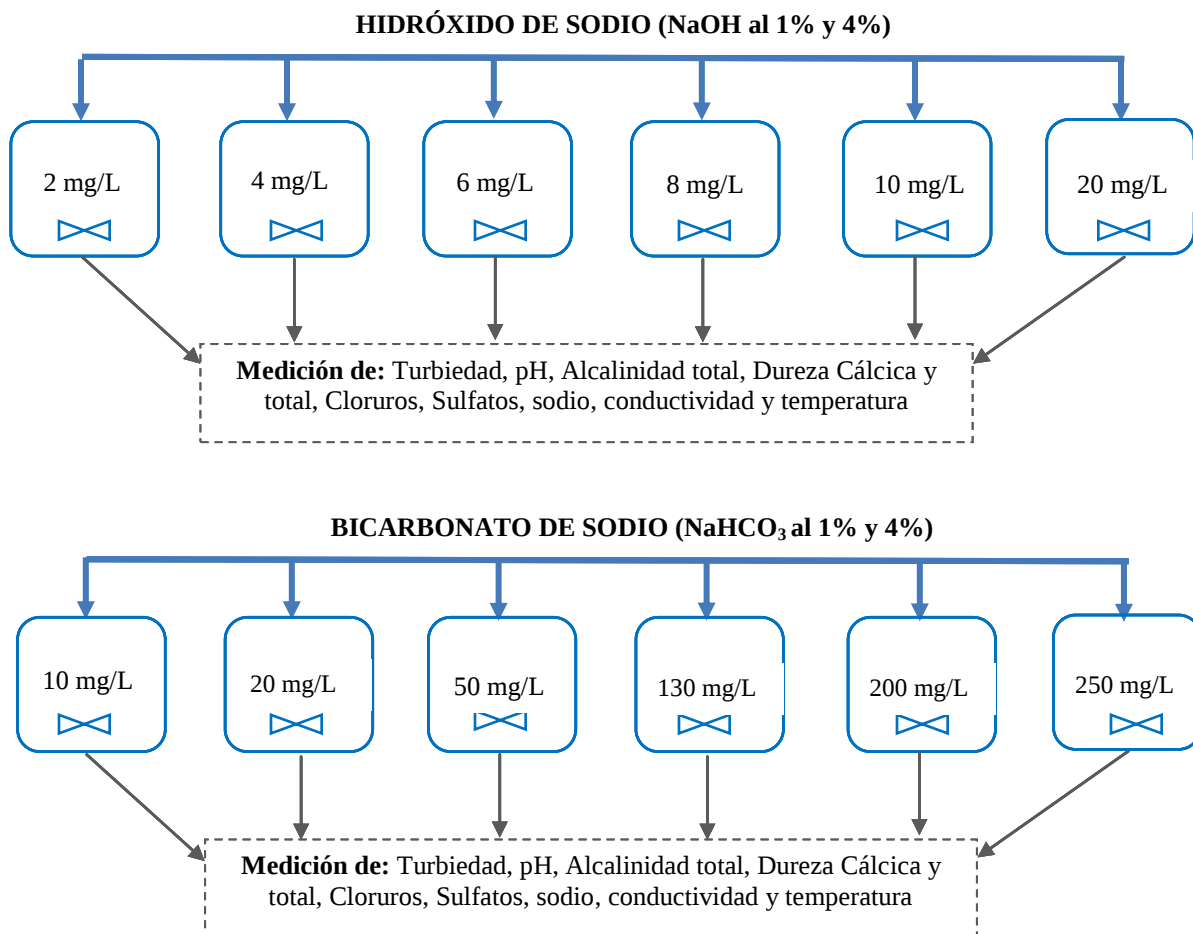
### 5.3.4 Etapa VI: Evaluación de los alcalinizantes NaOH y NaHCO<sub>3</sub> con el agua clorada del río Cauca (ensayos de dosificación)

Por medio de un diseño de experimentos con pruebas al azar, se realizaron ensayos de dosificación a escala de laboratorio con los alcalinizantes NaOH de la empresa QUIMPAC S.A. y NaHCO<sub>3</sub> de la marca YEQUIM, distribuido por MB Science, para lo cual se recolectaron muestras de agua clorada. Con el fin de determinar las dosis a evaluar, se realizaron ensayos preliminares en los cuales el ISL generaba rangos apropiados, es decir, valores que estuviesen por encima de cero. Para el caso del NaOH las dosis a evaluar fueron: 2, 4, 6, 8, 10 y 20 mg/L,

mientras que para el Bicarbonato de Sodio éstas fueron 10, 20, 50, 130, 200 y 250 mg/L.

Para los ensayos se utilizaron dos equipos de jar-test con el fin de tener réplicas de los experimentos, utilizando 2L de agua clorada y con condiciones de mezcla de 60 RPM durante 1 minuto, teniendo en cuenta las recomendaciones hechas por Marín (1995), Colindres (2010), QUIMPAC (2011) y Enríquez (2012).

Las variables monitoreadas antes y después de los ensayos fueron turbiedad, pH, alcalinidad total, dureza total, dureza cálcica, cloruros, sulfatos, sodio, conductividad y temperatura, de acuerdo con la metodología del APHA et al. (2005) (Tabla 5.2), el sodio se midió por medio de la técnica 3500-Na B. Como se mencionó previamente, estos son parámetros considerados como aquellos que tiene un importante efecto sobre la corrosión en el SDA y su control (Schock, 2002, WHO, 2011); el sodio fue medido ya que en altas concentraciones puede generar rechazo por parte de los consumidores. Los valores obtenidos para cada variable monitoreada se observan en el Anexo 10.2 y Anexo 10.3. Un esquema de los ensayos realizados se presenta en la Figura 5.4.



**Figura 5.4** Ensayos de dosificación para el Hidróxido de sodio y el Bicarbonato de sodio

### 5.3.5 Etapa VII: Sistematización y análisis estadístico de los resultados obtenidos para las variables monitoreadas en la etapa anterior

En esta etapa se realizó un análisis estadístico mediante gráficos de correlación, diagramas de cajas y pruebas estadísticas para los datos obtenidos en los ensayos de dosificación.

Se realizaron gráficos de correlación y la prueba de coeficiente de correlación de Spearman ( $r_s$ ) entre las dosis aplicadas de NaOH 1%, NaOH 4%,  $\text{NaHCO}_3$  1% y  $\text{NaHCO}_3$  4% y cada variable evaluada; esta prueba permite evaluar la relación existente entre estas dos variables cuantitativas. El coeficiente de correlación de Spearman oscila entre  $-1$  y  $+1$ . En este sentido, tan fuerte es una relación de  $+1$  como de  $-1$ . En el primer caso la relación es perfecta positiva y en el segundo perfecta negativa. Una correlación próxima a cero indica que no hay relación lineal entre las dos variables; es importante tener en cuenta que la correlación será significativa si su  $P < 0,05$ ; si no es significativa se presume entonces que  $r_s = 0$  (Fernández y Díaz, 2001).

Para determinar la existencia de diferencias significativas entre concentraciones de un mismo alcalinizante se realizó la prueba t-Student para el contraste de dos medias para las siguientes variables evaluadas: Dureza total, calcio y sodio. Debido a que el resto de variables evaluadas no cumplían con alguno de los supuestos que exige la prueba t-Student: normalidad y homocedasticidad, entonces para estas variables se utilizó la prueba no paramétrica Mann-Whitney; adicional a lo anterior se realizaron diagramas de cajas y alambres. Igualmente se evaluaron las diferencias significativas entre alcalinizantes (los cuatro ensayos), por medio de la comparación de las dosis en común entre ambos productos (10 y 20 mg/L) para las mismas variables mencionadas previamente. En este último caso se usó al análisis de varianza ANOVA y la prueba no paramétrica Kruskal- Wallis para aquellos parámetros cuyos datos no cumplieron con supuestos de normalidad y/o homocedasticidad.

La prueba t-Student permite hacer la valoración de si las medias de dos grupos son estadísticamente diferentes entre sí al igual que la prueba de Mann-Whitney, la cual es una buena alternativa para comparar dos grupos independientes por medio de la mediana de estos cuando no se cumplen los supuestos y no puede usarse la prueba t-Student (Gómez et al., 2013). El análisis de varianza (ANOVA) por otra parte, permite realizar la prueba de hipótesis sobre la igualdad de promedios del efecto de los ensayos mediante la prueba estadística F o el Valor P (Valor de significancia), definido como el valor de probabilidad de referencia para rechazar la hipótesis Nula que en este caso sería  $H_0$ ; según la literatura si el valor de la probabilidad (Valor- P) es menor que los niveles de significancia tradicionales de 0.01 y 0.05, la hipótesis nula será rechazada (Kuehl, 2001); como alternativa a la ANOVA, está la prueba Kruskal-Wallis que también permite la comparación de tres o más distribuciones independientes por medio de sus medianas cuando la variable no tiene una distribución semejante a la curva normal (Gómez et al., 2013). Para realizar las comparaciones en este estudio se utilizó en todos los casos un valor de significancia del 0.05.

Las hipótesis a probar con las pruebas t- Student y Mann Whitney entre concentraciones de un mismo alcalinizante para los parámetros evaluados se presentan en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4** Pruebas de hipótesis entre concentraciones de un mismo alcalinizante

| t-Student               | Mann Whitney          | Interpretación                                                                      | Decisión                                                                |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $H_0: \mu_1 = \mu_2$    | $H_0: MED1 = MED2$    | No hay diferencia significativa entre las concentraciones de un mismo alcalinizante | $P > \alpha$ ; es decir $P > 0,05$ : No se rechaza $H_0$                |
| $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ | $H_1: MED1 \neq MED2$ | Hay diferencia significativa entre las concentraciones del alcalinizante            | $P < \alpha$ ; es decir $P < 0,05$ : Se rechaza $H_0$ y se acepta $H_1$ |

$\mu_1$ : Media de cada grupo a comparar; MED: Mediana de cada grupo a comparar; Sig. Significancia

Las hipótesis a probar por medio de las pruebas ANOVA y Kruskal – Wallis entre los cuatro Ensayos con las dosis de 10 y 20 mg/L para los parámetros evaluados (se probaron también para el ISL y la relación alcalinidad/ $Cl^- + SO_4^{2-}$ ) se presentan en la Tabla 5.5:

**Tabla 5.5** Pruebas de hipótesis entre Ensayos (Dosis 10 y 20 mg/L)

| ANOVA                                                                                                                                                               | Kruskal- Wallis                                                                                                                                         | Interpretación                                              | Decisión                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$                                                                                                                                | $H_0: MED1 = MED2 = MED3 = MED4$                                                                                                                        | No hay diferencia significativa entre los ensayos           | $P > \alpha$ ; es decir $P > 0,05$ : No se rechaza $H_0$                |
| $H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ o } \mu_1 \neq \mu_3 \text{ o } \mu_1 \neq \mu_4 \text{ o } \mu_2 \neq \mu_3 \text{ o } \mu_2 \neq \mu_4 \text{ o } \mu_3 \neq \mu_4$ | $H_1: MED1 \neq MED2 \text{ o } MED1 \neq MED3 \text{ o } MED1 \neq MED4 \text{ o } MED2 \neq MED3 \text{ o } MED2 \neq MED4 \text{ o } MED3 \neq MED4$ | Hay diferencia significativa en al menos uno de los ensayos | $P < \alpha$ ; es decir $P < 0,05$ : Se rechaza $H_0$ y se acepta $H_1$ |

$\mu_1$ : Media de cada grupo a comparar; MED: Mediana de cada grupo a comparar

En aquellos casos de los ANOVA en los que se observó diferencia significativa entre los ensayos se realizó la prueba de Tukey al 5%, la cual permite identificar entre qué ensayos se encuentra dicha diferencia. En todos los análisis se utilizó el software Minitab 16®.

Adicional a lo anterior, los resultados obtenidos en los ensayos se compararon con la Resolución 2115 de 2007 y se analizó si la condición del agua con la adición de cada dosis de alcalinizante fue en teoría favorable o no para la formación de la película protectora de acuerdo con lo sugerido por Merrill y Sanks, (1977), RAS (2000) y Letterman (2001) a través de las siguientes condiciones:

- ❖ Índice de saturación de Langelier (ISL), el cual se calculó mediante la Ecuación 5.1.

$$ISL = pH - pH_s \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

Donde  $pH_s$  para pH entre 6.0 – 8.5 unidades y una alcalinidad total  $> 50 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ , es igual a:

$$pH_s = pK_2 - pK_s + P[Ca^{2+}] + P[Alk_t] + 5pfm \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

Para una alcalinidad total < 50 mgCaCO<sub>3</sub>/L, el  $pH_s$  estará dado por:

$$pH_s = pK_2 - pK_s + p[Ca^{2+}] + p[HCO_3^-] + 5pfm \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

Además, para el resto de variables:

$$pk_2 = \left( 107.8871 + 0.03252849T - \frac{5151.79}{T} - 38.92561 \log_{10} T + \frac{563713.9}{T^2} \right) \quad (\text{Ecuación 5.4})$$

$$pK_s = 171.9065 + 0.077993T - \frac{2839.319}{T} - 71.595 \log_{10} T \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

$$pK_w = \frac{4471}{T} + 0.01706T - 6.0875 \quad (\text{Ecuación 5.6})$$

$$pfm = \left[ \frac{AI^{1/2}}{1+I^{1/2}} \right] - 0.3I \quad (\text{Válido para } I < 0.5) \quad (\text{Ecuación 5.7})$$

$$A = 1.82 \times 10^6 (ET)^{-1.5} \quad (\text{Ecuación 5.8})$$

$$E = \frac{60954}{T+116} - 68.937 \quad (\text{Ecuación 5.9})$$

$$[HCO_3^-] = \frac{[Alk_t] + 10^{(pfm-pH)} - 10^{(pH+pfm-pK_w)}}{1 + 0.5 \times 10^{(pH-pK_2)}} \quad (\text{Ecuación 5.10})$$

Donde:

pH: pH medido en el sitio

pH<sub>s</sub>: pH de saturación

p: Designa el  $-\log_{10}$  de esa variable

K<sub>2</sub>: Constante de segunda disociación para el ácido carbónico a la temperatura del agua

K<sub>s</sub>: Constante de disociación de producto para la calcita

[Cat<sup>2+</sup>]: Calcio total, g-mol/L

[Alk<sub>t</sub>]: Alcalinidad total, g-mol/L

pfm: Coeficiente de actividad para especies monovalentes a temperatura especificada

[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]: Bicarbonatos, g-mol/L

T: Temperatura, grados Kelvin

K<sub>w</sub>: Constante del agua

E: Constante dieléctrica

I: Fuerza iónica

Adicionalmente para el cálculo de I se tuvo en cuenta:

$$I = 1.6 \times 10^{-5} * C \quad (\text{Ecuación 5.11})$$

Donde:

C= conductividad eléctrica (μS/cm)

Los resultados obtenidos para el ISL se interpretaron de la siguiente manera:

Si  $ISL > 0$ , se consideró un agua sobresaturada en la cual el  $CaCO_3$  tiende a depositarse.

Si  $ISL = 0$ , se consideró un agua saturada y en equilibrio en la cual el  $CaCO_3$  ni precipita ni se disuelve.

Si  $ISL < 0$ , se consideró un agua insaturada, en la cual el  $CaCO_3$  tiende a disolverse.

Además del ISL, se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

- ❖ Calcio y alcalinidad entre 40-60 mg  $CaCO_3/L$
- ❖ La relación (alcalinidad /  $Cl^- + SO_4^{2-}$ ), como mínimo debe ser de 5:1.

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a través de la implementación de la metodología descrita anteriormente son los siguientes:

### **6.1 Componente 1: Identificación de los alcalinizantes de mayor aplicabilidad para el proceso de ajuste del pH del agua tratada del río Cauca (Etapa I y II de la metodología)**

Los resultados de la revisión bibliográfica permitieron identificar los alcalinizantes más empleados en el proceso de ajuste del pH, siendo éstos: la Cal Hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH}_2)$ ), el Carbonato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), el Bicarbonato de Sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ), el Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y el Hidróxido de Sodio ( $\text{NaOH}$ ). Algunas de las principales características de los alcalinizantes no difieren entre sí como presentación con la cual se comercializan, la adquisición en Colombia, contenido activo, almacenamiento y equipos para la dosificación. Dichas características se presenta en la Tabla 6.1 para cada alcalinizante. Cabe mencionar que los datos que se presentan en este documento son para alcalinizantes de grado industrial.

**Tabla 6.1** Características similares entre los alcalinizantes de mayor aplicabilidad

| CARACTERISTICA                        | ALCALINIZANTES                                                                                                                                           |                                                                                       |                                            |                                                                                                                        |                                                                                                                                                                               | Referencias bibliográficas                |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                       | Cal Hidratada<br>$\text{Ca(OH)}_2$                                                                                                                       | Carbonato de Sodio<br>$(\text{Na}_2\text{CO}_3)$                                      | Bicarbonato de Sodio<br>$(\text{NaHCO}_3)$ | Carbonato de Calcio<br>$(\text{CaCO}_3)$                                                                               | Hidróxido de Sodio<br>$(\text{NaOH})$                                                                                                                                         |                                           |
| <b>Presentación del alcalinizante</b> | A partir de cal viva (CaO):<br>Granular, en sacos de 25-50kg.<br><br>A partir de cal apagada:<br>Polvo en empaques de polipropileno o en sacos de 25 kg. | Granular y en polvo en bolsas de 25kg y 50 kg.                                        | Polvo, en sacos de 25 kg y 50 kg.          | Granular y en polvo, en Sacos de polipropileno laminado con bolsa interior de polietileno sellada, capacidad de 25 Kg. | Polvo o escamas generalmente en sacos de 20 o 50 kg. También puede conseguirse en forma de solución al 25% o 50% en canecas y contenedores de 250kg y 1000kg respectivamente. | 1, 2, 14, 21, 27, 31, 33, 34, 35, 36, 38. |
| <b>Adquisición en Colombia</b>        | SI                                                                                                                                                       | SI (Producto químico controlado a nivel nacional como materia prima de estupecientes) | SI                                         | SI                                                                                                                     | SI                                                                                                                                                                            | 4, 5, 16, 18, 19, 20, 37                  |
| <b>Contenido activo (%)</b>           | A partir de Cal viva: 85-93<br>A partir de cal apagada: 65-72                                                                                            | 96-98                                                                                 | 93-99                                      | 97-98                                                                                                                  | Escamas: al 93- 99<br>Solución: 25-50                                                                                                                                         | 24, 31, 33, 34, 35, 36, 38.               |

| CARACTERISTICA                   | ALCALINIZANTES                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Referencias bibliográficas                   |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                  | Cal Hidratada<br>$\text{Ca(OH)}_2$                                                                                                                                                                                                                   | Carbonato de Sodio<br>$(\text{Na}_2\text{CO}_3)$                                                                                                                                                                               | Bicarbonato de Sodio<br>$(\text{NaHCO}_3)$                                                                                                                                                                          | Carbonato de Calcio<br>$(\text{CaCO}_3)$                                                                                                                                                         | Hidróxido de Sodio<br>$(\text{NaOH})$                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                              |
| <b>Almacenamiento</b>            | En seco y en lugares libres de $\text{CO}_2$ , con empaques bien cerrados. Temperatura de almacenamiento sin limitaciones. En general su tiempo máximo de almacenamiento son 3 meses.                                                                | En contenedores altamente sellados; lugares frescos, secos y ventilados. Protegido de calor excesivo y lejos de ácidos y agentes oxidantes.                                                                                    | En sacos bien cerrados, ambiente seco y fresco ( $T < 40^\circ\text{C}$ ), arrumes altos, máximo 4 metros en bodegas cubiertas. Alejado de ácidos y bases, y de productos de alta toxicidad y/o con olores fuertes. | En recipientes bien cerrados; lugares frescos, secos y ventilados. Lejos de fuentes de calor e ignición.                                                                                         | No debe almacenarse en recipientes de aluminio, estaño o zinc, debe estar cerrado, seco, alejado de los ácidos. La solución al 25% generalmente es más fácil de almacenar. Debido a sus bajas temperaturas de cristalización, la solución al 50% debe ser almacenada a $15^\circ\text{C}$ o quizá más para prevenir dicha cristalización. | 2, 6, 7, 24, 27, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38. |
| <b>Equipos para dosificación</b> | Se alimenta en forma de suspensión. Entre los equipos requeridos están: Un apagador de cal con tolva (Para cal hidratada a partir de cal viva) y sistema de alimentación, un depósito con un mezclador para la solución y una bomba de alimentación. | Alimentación en solución. Los equipos requeridos para su manejo son similares a los requeridos para la $\text{Ca(OH)}_2$ : un sistema de alimentación, un depósito con un mezclador para la solución y una bomba dosificadora. | Se dosifica en forma de solución. Debido a que es un producto químico seco, debe ser disuelto en un tanque de agua para la posterior dosificación.                                                                  | El $\text{CaCO}_3$ se pone en contacto mediante un filtro cerrado que contiene piedra caliza de alta pureza triturada. A medida que el agua pasa a través de la piedra caliza, esta se disuelve. | La solución se puede conseguir en barriles requiriéndose solo una bomba de dosificación.                                                                                                                                                                                                                                                  | 1, 2, 14, 24.                                |

**Fuente:** 1. Spencer et al. (2003); 2. Esvelt (2010); 4. Canteco S.A. (2014); 5. Química Básica S.A. (2014); 6. EPA (2004); 7. Colindres (2010); 14. Merrick and Company (2013); 16. Procecal S.A. (2014); 18. QUIMPAC (2014); 19. DQI S.A. (2014); 20. Helvecia SAS (2014); 21. Vargas et al. (2009); 24. Unit Standard 18452 (2002); 25. QMax S.A.<sup>a</sup> (2011); 31. DEP (2014); 32. QMax S.A.<sup>b</sup>. (2011); 33. QUIMPAC (2009); 34. SIGMA-ALDRICH (2012); 35. SIGMA-ALDRICH (2013); 36. MONTEC (2014); 37. CNE (1987); 38. Procecal S.A. (2009).

De acuerdo con la Tabla 6.1 se observa que la presentación de los alcalinizantes puede encontrarse en forma granular y polvo, así como empacados en cantidades que generalmente no superan los 50kg; lo anterior se exceptúa para el NaOH, producto que a diferencia de los demás también puede conseguirse en forma de solución, en presentaciones que pueden llegar a los 1000 kg en contenedores y disponibles en soluciones al 25% o 50% disminuyendo los requerimientos en cuanto a equipos especializados y manejo en su aplicación comparado con los otros alcalinizantes (Booth, 2011). Respecto a la adquisición en Colombia, en todos los casos existen empresas que llevan a cabo la venta de estos alcalinizantes. Para el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , es importante tener en cuenta que es un insumo químico controlado por la DNE (Dirección Nacional de Estupefacientes) de acuerdo con la Resolución 009 de 1987, por lo tanto su adquisición se limita a aquellas empresas que tengan permiso para su comercialización (CNE, 1987).

El porcentaje de contenido activo de los distintos alcalinizantes oscila entre un 93-99% con dos notables excepciones, por un lado el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que evidencia uno de los porcentajes más bajos de contenido activo (entre 65% y – 72%) comparados con el resto de alcalinizantes y por otro lado el NaOH en solución, cuyo contenido activo está entre 25-50%.

El almacenamiento es otra de las características que se da muy similar para todos los alcalinizantes, ya que estos deben ser almacenados en lugares frescos, secos, ventilados y alejados de agentes oxidantes y tóxicos. En el caso de los alcalinizantes en polvo, si estos se dejan expuestos, pueden fácilmente absorber dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua del aire formando una pasta muy difícil de remover, además de generar ambientes de trabajo indeseables, lo cual ocurre especialmente con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; en el caso del hidróxido de sodio, la solución al 25% es usualmente la más fácil de almacenar, ya que se requieren temperaturas más bajas para su cristalización comparada con la solución al 50% (Esvelt, 2010), aunque generalmente este alcalinizante en condiciones adecuadas no se deteriora rápidamente durante su almacenamiento (Manharawy y Hafez, 2002).

Finalmente, respecto a los equipos utilizados para la dosificación, en el caso del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$  son en general similares; por ser estos alcalinizantes secos se requiere un sistema de alimentación, un depósito para mezclar la solución y una bomba dosificadora; en el caso del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  cabe hacer la salvedad de que si es a partir de cal viva, es decir, si el proceso de apagado debe realizarse en la misma PTAP, se requerirá adicionalmente un apagador de cal. El  $\text{CaCO}_3$  y el NaOH son la excepción, ya que en el primer caso generalmente se utiliza un contactor (filtro cerrado) del  $\text{CaCO}_3$  por el cual pasa el agua que va disolviendo el alcalinizante no requiriendo este sistema de bombas o adición continua del alcalinizante. En el segundo caso el NaOH al conseguirse en solución puede requerirse por lo tanto solo una bomba para su dosificación.

A diferencia de la tabla anterior, la Tabla 6.2 presenta aquellas características en las que se hacen más evidentes algunas diferencias entre los alcalinizantes; entre éstas están la solubilidad, el riesgo de manejo, costo, aporte de cationes, alcalinidad y capacidad buffer, efecto sobre el pH, características del agua en la que se emplean, operación y mantenimiento.

**Tabla 6.2** Características diferentes entre los alcalinizantes de mayor aplicabilidad

| CARACTERISTICA                                                                                                                   | ALCALINIZANTES                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                    |                                                                                                                                |                                                                                                                                  |                                                                                                                                            | Referencias bibliográficas          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                                                                                                  | Cal Hidratada<br>$\text{Ca(OH)}_2$                                                                                                                                                                                                                            | Carbonato de Sodio<br>$(\text{Na}_2\text{CO}_3)$                                                                                   | Bicarbonato de Sodio<br>$(\text{NaHCO}_3)$                                                                                     | Carbonato de Calcio<br>$(\text{CaCO}_3)$                                                                                         | Hidróxido de Sodio<br>$(\text{NaOH})$                                                                                                      |                                     |
| <b>Solubilidad</b><br>(g/100g $\text{H}_2\text{O}$ ) 20°C                                                                        | 0.16                                                                                                                                                                                                                                                          | 21                                                                                                                                 | 9.6                                                                                                                            | 0.002                                                                                                                            | 109                                                                                                                                        | 3, 7,23, 31, 32, 33, 34, 35, 36,38. |
| <b>Riesgo de manejo</b><br>(Clasificación NFPA 704*)<br>En la cual:<br>0:Mínimo<br>1:Ligero<br>2:Moderado<br>3:Serio<br>4:Severo | A partir de cal viva:<br>Peligro a la salud ocupacional= 3<br>Peligro de Inflamabilidad = 0<br>Peligro de Reactividad = 0<br><br>A partir de cal apagada:<br>Peligro a la salud ocupacional= 2<br>Peligro de Inflamabilidad = 0<br>Peligro de Reactividad = 0 | Peligroso a la salud Ocupacional= 2<br>Peligro de Inflamabilidad= 0<br>Peligro de reactividad= 0                                   | Peligro a la salud Ocupacional= 0<br>Peligro de Inflamabilidad = 0<br>Peligro de Reactividad = 0                               | Peligro a la salud Ocupacional= 0<br>Peligro de Inflamabilidad = 0<br>Peligro de Reactividad = 0                                 | Peligro a la salud Ocupacional= 3<br>Peligro de Inflamabilidad = 0<br>Peligro de Reactividad = 1                                           | 27, 32, 33, 34, 35, 36              |
| <b>Costo de cada alcalinizante</b><br>(COP\$/ kilogramo)                                                                         | 500 - 700                                                                                                                                                                                                                                                     | 1050                                                                                                                               | 1300-1500                                                                                                                      | 400-700                                                                                                                          | Escamas: 3200 - 3800<br>Solución: 1200                                                                                                     | 5, 18, 20                           |
| <b>Tipo de plantas en las que se utiliza el alcalinizante</b>                                                                    | Extendido y asociado comúnmente a grandes PTAPs.                                                                                                                                                                                                              | Uso simple y asociado principalmente a PTAPs pequeñas.                                                                             | Alternativa segura y adecuada para sistemas pequeños.                                                                          | Generalmente se usa en PTAPs pequeñas y medianas.                                                                                | Apropiado para medianas y grandes PTAPs.                                                                                                   | 1, 3, 11, 13, 28                    |
| <b>Aporte de cationes al agua</b>                                                                                                | Añade iones de Calcio (Ca) al agua. Por <b>1mol</b> de $\text{Ca(OH)}_2$ , se adiciona <b>1 mol de <math>\text{Ca}^{++}</math></b> .                                                                                                                          | La dosis directa de <b>1 mol</b> de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ resulta en un incremento <b>2 moles de <math>\text{Na}^+</math></b> . | La dosis directa de <b>1 mol</b> de $\text{NaHCO}_3$ se refleja en un incremento de <b>1 mol de <math>\text{Na}^+</math></b> . | La dosis directa de <b>1 mol</b> de $\text{CaCO}_3$ se refleja en un incremento de <b>1 mol de <math>\text{Ca}^{++}</math></b> . | Cationes de sodio incrementan con su aplicación. Por <b>1mol</b> de $\text{NaOH}$ , se adiciona <b>1 mol de <math>\text{Na}^+</math></b> . | 9, 10, 12, 15, 26                   |
| <b>Aporte de alcalinidad al agua</b>                                                                                             | Contribuye al aumento de la alcalinidad en <b>1.21 mg/L</b> como $\text{CaCO}_3$ por 1 mg/L de $\text{Ca(OH)}_2$ añadido.                                                                                                                                     | Por 1mg/L de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ se incrementa en <b>0.94 mg/L</b> la alcalinidad como $\text{CaCO}_3$ .                      | Por 1mg/L de $\text{NaHCO}_3$ se incrementa en <b>0.59 mg/L</b> la alcalinidad como $\text{CaCO}_3$ .                          | Por 1mg/L de $\text{NaHCO}_3$ se incrementa en <b>1.00 mg/L</b> la alcalinidad como $\text{CaCO}_3$ .                            | Produce un incremento de alrededor de <b>1.55 mg/L</b> como $\text{CaCO}_3$ por 1mg/L de $\text{NaOH}$ .                                   | 6, 15, 26, 28                       |

| CARACTERISTICA                      | ALCALINIZANTES                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                           | Referencias bibliográficas             |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
|                                     | Cal Hidratada<br>$\text{Ca(OH)}_2$                                                                                                                                         | Carbonato de Sodio<br>$(\text{Na}_2\text{CO}_3)$                                                                                                                                             | Bicarbonato de Sodio<br>$(\text{NaHCO}_3)$                                                                                                                                                    | Carbonato de Calcio<br>$(\text{CaCO}_3)$                                                                | Hidróxido de Sodio<br>$(\text{NaOH})$                                                                                                                                                                                                     |                                        |
| <b>Aporte a la Capacidad Buffer</b> | No contribuye a la capacidad buffer del sistema ya que no incrementa el CIT.                                                                                               | Sí contribuyen a la capacidad buffer. Por la adición de 1mol del alcalinizante se incrementa en <b>1 mol el CIT</b> del agua.                                                                |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                         | No contribuye a la capacidad buffer del agua, pues no aporta ninguna de las especies del CIT.                                                                                                                                             | 15, 28                                 |
| <b>Efecto sobre el pH</b>           | Produce un incremento en el pH del agua, hasta <b>12.4 unidades</b> , aunque este puede ser difícil de controlar en aguas de baja alcalinidad y con baja capacidad buffer. | Produce un incremento moderado del pH, hasta <b>11.4 unidades</b> , aunque mayor que el $\text{NaHCO}_3$ en ocasiones este puede llegar a ser muy alto requiriendo el uso de $\text{CO}_2$ . | Incrementa el pH del agua hasta <b>8.3-8,5 unidades</b> solamente. Si se requiere un aumento más drástico del pH se puede usar en conjunto con $\text{Na}_2\text{CO}_3$ o con $\text{NaOH}$ . | Produce un incremento moderado del pH, hasta <b>10.0 unidades</b> .                                     | Incrementa el pH del agua con pequeñas dosis y más rápido que la alcalinidad: un cambio de $\pm 1\text{mg/L}$ en la dosis puede significar un aumento de más de 2 unidades en el pH. Puede incrementar el pH hasta <b>14.0 unidades</b> . | 1, 2, 6, 9, 13, 23, 25, 26, 27, 30, 31 |
| <b>Características del agua</b>     | pH < <b>7.2 unidades</b><br>Alcalinizante muy adecuado para aguas bajas en alcalinidad < <b>20mg/L</b> y calcio, así como con un valor de CIT > <b>5mg/L</b>               | pH < <b>7.2 unidades</b><br>Apropiada para ajustar el pH en aguas de muy baja alcalinidad < <b>20mg/L</b> y con concentración de CIT < <b>5mg/L</b>                                          | pH < <b>7.2 unidades</b><br>Es típicamente aplicado a aguas con muy baja alcalinidad < <b>20mg/L</b> y baja concentración de CIT < <b>5mg/L</b>                                               | pH < <b>7.2 unidades</b><br>Aguas con alcalinidad < <b>20mg/L</b> y concentración de CIT < <b>5mg/L</b> | pH < <b>7.2 unidades</b><br>El uso de este alcalinizante es adecuado para aguas crudas con un valor de alcalinidad > <b>20mg/L</b> y CIT > <b>5mg/L</b>                                                                                   | 1, 2, 17, 26                           |
| <b>Operación y mantenimiento</b>    | Algo difícil su manejo y operación. Mantenimiento intensivo.                                                                                                               | más fáciles de controlar, operar y limpiar que la cal.                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                               | Fáciles de operar<br>Poco mantenimiento.                                                                | Fácil de operar y mantener. Las mayores precauciones se deben tener en la dosificación.                                                                                                                                                   | 2, 8, 22, 26, 28, 29, 31               |

**Fuente:** \*NFPA 704: National Fire Protection Association 704 (*Asociación Nacional de Protección contra el Fuego 704*; 1. Spencer et al. (2003); 2. Esvelt (2010); 3. Cotoruelo y Marqués (1999); 5. Química Básica S.A. (2014); 6. EPA (2004); 7. Colindres (2010); 8. Torres et al. (2008); 9. Kim et al. (2008); 10. CONAGUA (2007); 11. Labiod y Ghizellaoui, (2012); 12. Manharawy y Hafez (2002); 13. GQ (2006); 15. Birnhack et al. (2011); 17. AWWA (2011); 18. QUIMPAC (2014); 20. Helvecia SAS (2014); 22. Sallanko et al. (2013); 23. Grupo CALIDRA (2007); 25. QMax S.A.<sup>a</sup> (2011); 26. USEpa (1992); 27. CISPROQUIM (2005); 28. AWWA, 1996; 29. Ontario(2009); 30.Sudecap (2008) 31. DEP (2014); 32. QMax S.A.<sup>b</sup>. (2011); 33. QUIMPAC (2009); 34. SIGMA-ALDRICH (2012); 35. SIGMA-ALDRICH (2013); 36. MONTEC (2014); 38. Procecal S.A. (2009).

En cuanto a la solubilidad, al contrastar los distintos valores que se presentan en la Tabla 6.2, los cuales se encuentran en las mismas condiciones de volumen de agua y temperatura, se hace evidente que el alcalinizante que mejor se disuelve en el agua es el NaOH con una solubilidad de 109g/100g H<sub>2</sub>O a 20°C, de tal manera que al comparar el resto de alcalinizantes con éste, se obtiene que el CaCO<sub>3</sub>, teniendo la segunda mayor solubilidad, presenta una capacidad de disolución en el agua 5.2 veces más baja que la del NaOH; la solubilidad del NaHCO<sub>3</sub> es 11.3 veces menor, mientras que el Ca(OH)<sub>2</sub> y el CaCO<sub>3</sub> siendo los alcalinizantes menos solubles, tienen solubilidades 681,25 y 54500 veces respectivamente más bajas que las del hidróxido de sodio.

Por otra parte, para establecer la comparación en cuanto al riesgo de manejo de cada uno de los alcalinizantes, se utilizó la norma NFPA 704, la cual clasifica las sustancias para tres tipos de peligrosidad: salud ocupacional, inflamabilidad y reactividad. En cuanto al peligro respecto a la salud ocupacional hay dos alcalinizantes que representan el mayor grado de peligro (peligro serio), siendo estos el NaOH y el Ca(OH)<sub>2</sub> a partir de cal viva, ya que son altamente corrosivos provocando quemaduras en áreas de contacto, lesiones oculares que pueden llevar a ceguera permanente; la inhalación de estos alcalinizantes puede generar serios daños en el tracto respiratorio llegando a ser mortales si se ingieren (Unit Standard 18452, 2002; QUIMPAC, 2014).

Después de estos alcalinizantes, el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> tiene un grado moderado de peligrosidad ya que es menos corrosivo que los anteriores, pero aun así puede causar irritación en los ojos, la piel, el sistema respiratorio y hay riesgo de dolor de garganta y sangrado de la nariz a causa de exposiciones prolongadas y elevadas concentraciones. Los alcalinizantes que presentan peligro mínimo en términos de salud ocupacional son el CaCO<sub>3</sub> y el NaHCO<sub>3</sub>, pero también puede generar leves irritaciones en el tracto respiratorio, en la piel u ojos en caso de inhalación o contacto. En todos los casos es importante la utilización de equipo de protección personal antes de manipular cualquiera de los alcalinizantes con severo o mínimo grado de peligrosidad (Colindres, 2010; DEP, 2014). Respecto a la inflamabilidad, la clasificación para todos los alcalinizantes es 0, es decir que existe un peligro mínimo de que estos se quemen a cualquier temperatura. Similar ocurre con el peligro de reactividad, en el cual tan sólo el NaOH presenta un grado ligero de peligrosidad para esta característica, ya que si bien es estable a condiciones normales de presión y temperatura, deben evitarse condiciones de temperatura menores a 15°C (QUIMPAC, 2014); el resto de alcalinizantes son valorados con grado 0 (mínimo) para esta característica.

Otra de las características tenidas en cuenta es el costo por kg de alcalinizante; en la Tabla 6.2 puede observarse que los alcalinizantes más económicos son el CaCO<sub>3</sub> y el Ca(OH)<sub>2</sub>, mientras que el más costoso es el Hidróxido de sodio en escamas, con un costo entre 5-8 veces mayor que el costo del CaCO<sub>3</sub> y el Ca(OH)<sub>2</sub>. El Carbonato y Bicarbonato de sodio presentan un costo intermedio. Pese a lo anterior, es importante tener en cuenta otros factores que pueden hacer económicamente viable o no la escogencia de un determinado alcalinizante como la inversión en capital y el costo en operación y mantenimiento.

Respecto a lo anterior, en el caso del Ca(OH)<sub>2</sub> a partir de cal viva, si bien es junto con el CaCO<sub>3</sub> el alcalinizante por kg más económico, es necesario tener instalaciones en la PTAP para llevar a cabo el apagado de la cal viva, lo cual incrementa la inversión en capital (Freese et al., 2003). El Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y el NaHCO<sub>3</sub> además de ser más costosos por kg en comparación con

la cal hidratada, suelen requerir mayores dosis para alcanzar un determinado pH (EPA, 2004) haciendo que estos alcalinizantes sean significativamente más costosos (entre 2-4 veces mayor) por cada 1000 m<sup>3</sup> de agua tratada, aunque los costos en cuanto a operación y mantenimiento son muy similares con respecto al Ca(OH)<sub>2</sub>. El NaOH, si bien es el alcalinizante más costoso por kg, siendo alrededor de 1.5 veces más costoso que la cal hidratada por cada 1000m<sup>3</sup> de agua tratada, es el alcalinizante menos costoso (alrededor de 2.5 veces menos) en términos de operación y mantenimiento respecto a todos los demás alcalinizantes (Ballantyne, 2004; Esvelt, 2010).

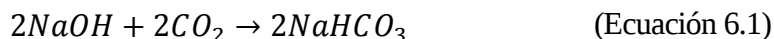
En relación con el tipo de planta, el Ca(OH)<sub>2</sub> generalmente se asocia a grandes PTAP, en las cuales los costos por los equipos y el manejo son compensados por el ahorro en costos de químicos (Esvelt, 2010); de igual manera el NaOH generalmente no se recomienda para sistemas muy pequeños, es preferible que este sea empleado en sistemas grandes que posean equipos avanzados de monitoreo y control para la dosificación (AMEC, 2011). Contrario a lo anterior, el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y el NaHCO<sub>3</sub> se asocian principalmente a PTAPs pequeñas debido a que son más fáciles de manejar y dosificar que el Ca(OH)<sub>2</sub> (Freese et al., 2003), de hecho, estos alcalinizantes suelen ser recomendables para el ajuste de pH en escuelas, condominios y otros lugares donde los recursos técnicos son limitados (Spencer et al. 2003); similar ocurre con el CaCO<sub>3</sub>, cuya relativa facilidad de operación hace que sea utilizado típicamente en PTAPs pequeñas.

El aporte de cationes es otra característica que también varía dependiendo del alcalinizante, dos de éstos aportan cationes de calcio al agua en la misma proporción, estos son el Ca(OH)<sub>2</sub> y el CaCO<sub>3</sub>; si bien estos cationes no se consideran nocivos para la salud humana, sí incrementan la dureza cálcica, lo que eventualmente puede traducirse en incrustaciones tanto dentro de la PTAP como en el SDA (Spencer et al. 2003; WHO, 2011); además, al estar en concentraciones muy altas la aceptabilidad pública se podría ver afectada, ya que los consumidores pueden llegar a percibir este cambio en la dureza del agua al requerir jabón en exceso para llevar a cabo las actividades de limpieza (WHO, 2011), por ende su valor máximo aceptable en el agua tratada a nivel nacional es de 60mg/L (MPS/MAVDT; 2007).

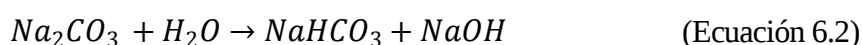
Por otro lado, el NaHCO<sub>3</sub> y el NaOH aportan en igual proporción cationes de sodio al agua (1mol de Na<sup>+</sup> por cada mol de NaOH); el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> por su parte también adiciona este tipo de cationes, pero a diferencia de los anteriores, lo hace en una mayor proporción (2 moles de Na<sup>+</sup> por cada mol de alcalinizante). El Na<sup>+</sup> no es un parámetro regulado a nivel nacional debido a la falta de evidencias que muestren una asociación entre los niveles usuales de este catión en el agua potable y problemas de salud, específicamente hipertensión en la población general (Esvelt, 2010; WHO, 2011; DEP, 2014); pese a esto es importante mencionar que el aumento de la concentración de estos cationes en el agua puede llegar a incrementar las molestias en cuanto al sabor por parte de los consumidores disminuyendo su aceptabilidad, razón por la cual es importante mantener su concentración en valores menores al umbral de percepción de sabor (200mg/L) (WHO, 2011).

La alcalinidad es una característica que incrementa con la aplicación de todos estos alcalinizantes, pero aumenta en distintas proporciones dependiendo el alcalinizante aplicado. Al adicionar 1mg/L de cada uno, el que mayor incremento genera en la alcalinidad del agua es el NaOH (1.55 mg/L como CaCO<sub>3</sub>), seguido por el Ca(OH)<sub>2</sub> (1.21 mg/L como CaCO<sub>3</sub>); ambos alcalinizantes incrementan la alcalinidad al añadir iones de hidróxido al agua; además

si bien estos iones no contribuyen directamente con la alcalinidad carbonatada, al reaccionar con el  $\text{CO}_2$  presente en el agua contribuyen con este tipo de alcalinidad (Pérez y Torres, 2008; Esvelt, 2010). La Ecuación 6.1 muestra la reacción para el NaOH en donde se requieren 2 moles de  $\text{CO}_2$  para generar 2 moles de  $\text{NaHCO}_3$  (Pérez y Torres, 2008):



Por otro lado, 1mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$  contribuyen a la alcalinidad con incrementos de 1.0mg/L, 0.94mg/L y 0.59mg/L respectivamente; estos alcalinizantes, a diferencia de los anteriores, contribuyen directamente a la alcalinidad carbonatada porque agregan iones carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) o bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) al agua (De Sousa et al., 2010), como se presenta en la Ecuación 6.2, Ecuación 6.3 y Ecuación 6.4 para el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al momento de ser añadido al agua (Kim et al., 2008):



Además de lo anterior, este aporte de especies carbonatadas (especies del CIT) hace que estos alcalinizantes ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$ ) sean los únicos de los cinco comparados que además de producir cambios en la alcalinidad, producen cambios en el valor del CIT siendo así capaces de proporcionar capacidad de amortiguación o capacidad buffer al agua, (AWWA, 1996; Spencer et al., 2003; Casey, 2009), de tal manera que la aplicación de estos alcalinizantes permite generar un agua estable capaz de resistir cambios bruscos de pH a medida que transita por el SDA (Booth, 2011; McClintock, 2013). Un agua sin suficiente capacidad buffer conduce a que el pH y la corrosión sean muy difíciles de controlar ya que esta última requiere rangos específicos de pH para ser efectivo su control (Spencer et al., 2003; Ontario, 2009; Birmhack et al., 2011; DEP, 2014).

En cuanto al efecto sobre el pH, en la Tabla 6.2 se aprecia claramente que todos incrementan este parámetro; sin embargo, algunos alcalinizantes tienen la capacidad de incrementar el pH más que otros. Para el caso del NaOH, con pequeñas dosis puede aumentar el pH sustancial y rápidamente, más rápido que la alcalinidad (Unit Standard 18452, 2002), de manera tal que tan solo el cambiar la dosis en 1 mg/L puede traducirse en un cambio de 100 veces en la concentración de iones de hidrógeno llegando hasta un pH incluso de 14.0 unidades (Spencer et al., 2003). Aun así cabe hacer la salvedad de que con este alcalinizante esto no necesariamente garantiza que se obtengan valores positivos para el ISL (Esvelt, 2010).

El  $\text{Ca(OH)}_2$  es el alcalinizante que después del NaOH puede producir el valor de pH más elevado (alrededor de 12.4 unidades), pero a diferencia de este, cuando se producen cambios en la dosis del  $\text{Ca(OH)}_2$  el cambio del pH ocurre más lentamente (AMEC, 2011); por su parte, el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  incrementa el pH debido a la disociación del NaOH generado (Ecuación 6.4) liberando un ion  $\text{OH}^-$  (Kim et al., 2008). Este alcalinizante produce un incremento moderado del pH aunque mayor al incremento que produce el  $\text{NaHCO}_3$  (DEP, 2014), llegando hasta alrededor de 11.3 unidades.

El  $\text{NaHCO}_3$  por otro lado, es el alcalinizante que genera el menor incremento en el pH, ya que solo puede aumentar este parámetro hasta 8.3-8,5 unidades, lo que en algunos casos puede llevar a que se use en conjunto con otro alcalinizante si se requiere un incremento más significativo de este parámetro (AMEC, 2011). Pese a esto, es un alcalinizante que permite conservar el pH final del agua tratada dentro de los rangos aceptables para el agua de consumo humano (Bordoloi et al., 2013); con los alcalinizantes  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$  generalmente se requiere la adición de más químicos de lo que se requeriría con una base fuerte como el  $\text{NaOH}$  para alcanzar un mismo pH (DEP, 2014).

Finalmente, en el caso del  $\text{CaCO}_3$  debido al tipo de sistema que se utiliza (contactores), el pH del agua tratada depende entonces en gran medida del tiempo de contacto y del caudal que se maneje en la PTAP (AMEC, 2011). Aunque con este alcalinizante se puede alcanzar un pH de 10.0 unidades, no hay posibilidad de sobredosis porque el pH de equilibrio cuando se emplea Carbonato de calcio raramente supera las 8.5 unidades (Sallanko et al., 2013).

Además de tener en cuenta las características propias de los alcalinizantes, son importantes también las características del agua en la que serán aplicados, pues de éstas dependerá en gran medida el desempeño que tendrá el alcalinizante seleccionado para su aplicación. El uso de todos los alcalinizantes es adecuado para aguas con pH menor a 7.2 unidades, ya que estas son generalmente corrosivas debido a su alta concentración de iones de Hidrogeno, por lo tanto incrementar el pH (especialmente por encima de 8.0 unidades) con estos alcalinizantes lleva a la formación de compuestos relativamente insolubles disminuyendo así la probabilidad de corrosión en el SDA (Esvelt, 2010).

Tanto para la adición de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$  se coincide en que lo recomendable es que la alcalinidad del agua esté por debajo de 20 mg/L, debido a que la formación de carbonatos insolubles (los cuales protegen de la corrosión) se forman cuando se usan estos químicos, incrementando el valor de la alcalinidad (Freese et al., 2003); para el  $\text{CaCO}_3$  lo recomendable es que este valor de alcalinidad no supere los 100 mg/L de manera tal que permita la correcta disolución del Carbonato de calcio en el agua (Mohd, 2003).

En el caso del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , también se recomienda su uso en aguas de baja alcalinidad (<20 mg/L) debido a que si la alcalinidad del agua es demasiado alta los iones de calcio se pueden combinar con carbonatos para formar exceso de carbonatos de calcio, los cuales tienden a dificultar la disolución de la Cal, contrario a lo que ocurre en aguas con más baja alcalinidad que permiten una mejor disolución del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  lo que a su vez facilita el incremento del pH del agua (Kirmeyer, 2000). Contrario a lo anterior, aguas con alcalinidad por encima de 20mg/L son más recomendables al emplear  $\text{NaOH}$ , esto con el fin de mantener un buen control del pH (DEP, 2014).

De acuerdo con los valores de CIT, el  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$  son apropiados para aguas con un valor menor a 5mg/L para este parámetro, debido a que iones de carbonato deben ser adicionados para formar carbonatos insolubles (Schock, 2002); mientras que el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el  $\text{NaOH}$  al no aportar especies carbonatadas es mejor emplearlos en aguas con  $\text{CIT} > 5$  mg/L; además para el  $\text{NaOH}$  es recomendable un valor de CIT superior a los 5mg/L debido a que al adicionar este alcalinizante en aguas con muy baja capacidad buffer puede generar que un pequeño cambio en la dosis del  $\text{NaOH}$  aumente demasiado el pH del agua o en caso contrario

resulte en un pH muy bajo, haciendo la dosificación de este alcalinizante muy difícil de controlar (AWWA, 2011; Htec Systems, 2005; Ontario, 2009; AMEC, 2011 ).

Finalmente, la Tabla 6.2 permite observar que también la operación y mantenimiento son características que varían dependiendo el alcalinizante que se emplee; algunos son más fáciles de manejar y aplicar que otros como es el caso del NaOH que permite llevar a cabo una operación limpia y estable (Manharawy y Hafez, 2002); sin embargo, las mayores precauciones en el uso de este alcalinizante deben ser tomadas en la dosificación, ya que – como se ha mencionado previamente- el pH puede aumentar bruscamente y más rápido que la alcalinidad, lo que en aguas con alta dureza cálcica puede generar precipitación de carbonato de calcio obstruyendo las tuberías y/o medios filtrantes (Unit Standard 18452, 2002); adicional a esto, es importante tener en cuenta al emplear este alcalinizante que por su carácter corrosivo se hace necesario el uso de gafas de seguridad, guantes resistentes a productos químicos y vestimenta de protección adecuada para evitar quemaduras (QUIMPAC, 2014).

El  $\text{CaCO}_3$  es otro de los alcalinizantes cuyo sistema es de fácil manejo ya que los contactores de carbonato de calcio, si bien requieren que eventualmente la piedra caliza sea reemplazada, es un sistema cuyo hecho de no demandar bombeo o adición continua del alcalinizante lo hace fácil de operar y de bajo requerimiento en cuanto a mantenimiento (AMEC, 2011). En el caso del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y del  $\text{NaHCO}_3$ , aunque los requerimientos en equipos son similares a los utilizados para el  $\text{Ca(OH)}_2$ , las dificultades operacionales no son tan extremas y por lo tanto son más fáciles de controlar y de limpiar (Esvelt, 2010; Merrick and Compañy, 2013). Finalmente el  $\text{Ca(OH)}_2$  es sin duda el alcalinizante que requiere mayor atención operacional pues no sólo puede generar problemas de polvo y un ambiente de trabajo indeseable, sino también obstruir el equipo de dosificación, tiende a taponar válvulas y a depositarse en tuberías y tanques (Esvelt, 2010), razón por la que todas las bombas, válvulas y las tuberías deben revisarse y limpiarse con regularidad para evitar la acumulación de incrustaciones de carbonato de calcio, lo cual hace algo difícil para los operarios su manejo (Unit Standard 18452, 2002; Ontario, 2009; Merrick and Compañy, 2013).

La comparación anterior permitió observar que existen distintas alternativas en cuanto a alcalinizantes para llevar a cabo el ajuste del pH de aguas tratadas en plantas de potabilización; alternativas que incluyen  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  e NaOH. La comparación teórica de estos alcalinizantes permitió evidenciar que todos los alcalinizantes presentan ventajas y desventajas que influyen en su selección y que por lo tanto, dicha selección está sujeta a distintas variables como su disponibilidad, su costo, el efecto que generan en el agua aplicada, entre otras características técnicas.

De acuerdo con lo anterior y con el fin de evaluar dos alcalinizantes alternativos al  $\text{Ca(OH)}_2$  que es el producto actualmente empleado en el agua tratada del río Cauca, se descartaron precisamente el  $\text{Ca(OH)}_2$  por ser el alcalinizante aplicado actualmente y el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$ ; el primero tiene limitaciones en cuanto a su adquisición ya que es una sustancia controlada nacionalmente por lo que requiere de permisos especiales para su uso, mientras que el segundo presenta inconvenientes técnicos relacionados con su dosificación, para lo cual se requeriría un cambio de tecnología a un contactor o filtro cerrado.

El NaOH y el  $\text{NaHCO}_3$  fueron los alcalinizantes seleccionados. El primero de éstos se seleccionó además, porque teóricamente es una buena opción, ya que puede ser adquirido

fácilmente y en solución, lo cual simplifica su manejo y operación, porque es apropiado para grandes PTAP como es el caso de la PTAP Puerto Mallarino que trata un agua cruda con alcalinidades que generalmente están por encima de los 20 mg/L y porque es conocido y ha sido aplicado presentando buen desempeño en la etapa de ajuste del pH de aguas tratadas. El  $\text{NaHCO}_3$  por otra parte, si bien puede no ser la mejor opción como alcalinizante para la PTAP de Puerto Mallarino ya que no es usualmente empleado en grandes PTAP, se seleccionó teniendo en cuenta que los requerimientos en equipos para su dosificación –sin incluir el proceso de apagado– son similares a los del  $\text{Ca(OH)}_2$ , pero su operación y mantenimiento son más simples; además es un alcalinizante que puede brindar un aporte muy importante a la capacidad buffer del agua.

## **6.2 Componente 2: Evaluación a escala de laboratorio de los alcalinizantes NaOH y $\text{NaHCO}_3$ para el ajuste del pH del agua tratada del río Cauca producida por la PTAP Puerto Mallarino**

### **6.2.1 Etapa III y IV: Recopilación, sistematización y análisis estadístico de información histórica y de monitoreos**

En esta etapa se evaluó el comportamiento de los principales parámetros operacionales del proceso de ajuste de pH con  $\text{Ca(OH)}_2$  que lleva a cabo la PTAP Puerto Mallarino: turbiedad, pH, Alcalinidad total, dureza total y cálcica, calcio, cloruros, sulfatos, conductividad y temperatura (Schock; 2002; EPA, 2004; Kim et al., 2008, De Sousa et al., 2010). Se evaluó el comportamiento histórico de estas variables por medio de información recopilada de la PTAP; además de esto, se analizó también el comportamiento más reciente de estos mismos parámetros, para lo cual se llevaron a cabo 6 jornadas de monitoreo. Los datos medidos en los monitoreos se presentan en el Anexo 10.1.

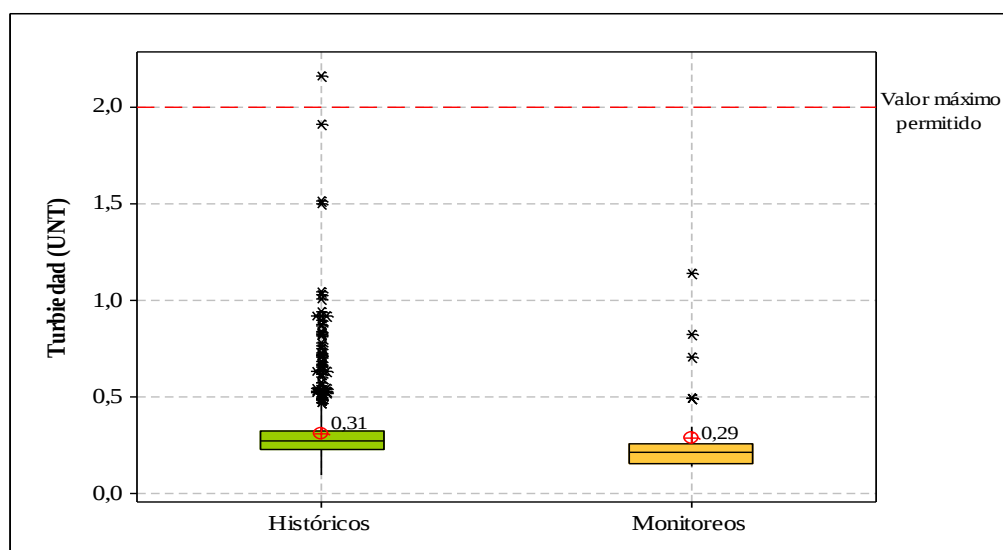
El resumen del análisis estadístico por medio de indicadores de tendencia central (Promedio y mediana), de dispersión (desviación estándar, valores máximos y mínimos) y de posición (cuartiles) tanto para los datos históricos como de monitoreo se presentan en la Tabla 6.3; además para ilustrar el comportamiento de los datos mencionados, estos se representan en las Figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9.

**Tabla 6.3** Resumen estadístico para las variables del proceso de ajuste de pH. Datos históricos y de monitoreos.

| VARIABLE                                             |      | Prom.  | $\sigma$ | Mín.   | Q1     | Med.   | Q3     | Máx.   | Rango aceptable<br>Res. 2115 2007 | Rango<br>Recomendado                 | Referencia<br>bibliográfica                           |
|------------------------------------------------------|------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Turbiedad<br/>(UNT)</b>                           | His. | 0,31   | 0,18     | 0,10   | 0,23   | 0,27   | 0,33   | 2,16   | < 2                               | < 0,1<br>< 0,5                       | EPA (2014)<br>WHO (2011)                              |
|                                                      | Mon. | 0,29   | 0,23     | 0,14   | 0,15   | 0,21   | 0,26   | 1,14   |                                   |                                      |                                                       |
| <b>pH<br/>(Unidades)</b>                             | His. | N/A    | N/A      | 6,15   | 6,99   | 7,18   | 7,48   | 9,85   | 6,5 -9,0                          | 6,5 – 8,5<br>pHs: 8,7 – 9,0          | WHO (2011)<br>Bueno et al. (2014)                     |
|                                                      | Mon. | N/A    | N/A      | 6,63   | 6,99   | 7,54   | 7,67   | 8,11   |                                   |                                      |                                                       |
| <b>Alcalinidad Total<br/>(mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b> | His. | 21,16  | 4,99     | 10,24  | 17,88  | 21,12  | 24,21  | 40,11  | < 200                             | 40 - 200                             | Merrill y Sanks (1977)<br>Neira ( 2006)               |
|                                                      | Mon. | 21,47  | 3,63     | 11,90  | 19,62  | 21,40  | 23,25  | 29,40  |                                   |                                      |                                                       |
| <b>Dureza Total<br/>(mgCaCO<sub>3</sub>/L)</b>       | His. | 51,31  | 9,08     | 25,88  | 45,95  | 49,00  | 57,26  | 76,92  | < 300                             | 40-60                                | RAS (2000)                                            |
|                                                      | Mon. | 46,76  | 4,12     | 35,40  | 44,65  | 46,75  | 49,73  | 57,00  |                                   |                                      |                                                       |
| <b>Dureza Cálctica<br/>(mgCaCO<sub>3</sub>/L)</b>    | His. | 37,77  | 8,26     | 14,21  | 32,70  | 37,40  | 42,74  | 62,78  | -                                 | >40                                  | Merrill y Sanks (1977)<br>Esvelt (2010)<br>WHO (2011) |
|                                                      | Mon. | 32,46  | 4,44     | 17,60  | 30,03  | 33,45  | 34,98  | 38,80  |                                   |                                      |                                                       |
| <b>Calcio<br/>(mg/L)</b>                             | His. | 15,10  | 3,29     | 5,70   | 13,09  | 14,92  | 17,11  | 25,16  | < 60                              | >16                                  | Merrill y Sanks (1977)<br>Esvelt (2010)<br>WHO (2011) |
|                                                      | Mon. | 13,01  | 1,78     | 7,05   | 12,03  | 13,41  | 14,02  | 15,55  |                                   |                                      |                                                       |
| <b>Cloruros (mg/L)</b>                               | His. | 19,54  | 5,73     | 0,29   | 16,19  | 18,79  | 22,87  | 45,87  | < 250                             | < 50                                 | Gray (2008)                                           |
|                                                      | Mon. | 16,43  | 2,26     | 14,60  | 14,60  | 15,92  | 18,09  | 20,16  |                                   |                                      |                                                       |
| <b>Sulfatos (mg/L)</b>                               | His. | 12,03  | 7,29     | 3,61   | 7,98   | 10,26  | 13,16  | 19,29  | < 250                             | < 50                                 | Gray (2008)                                           |
|                                                      | Mon. | 12,47  | 1,81     | 10,00  | 10,90  | 12,55  | 13,92  | 14,90  |                                   |                                      |                                                       |
| <b>Conductividad<br/>(uS/cm)</b>                     | His. | 133,65 | 20,74    | 91,30  | 117,62 | 130,45 | 148,30 | 212,00 | < 1000                            | -                                    | -                                                     |
|                                                      | Mon. | 143,37 | 6,40     | 129,90 | 138,25 | 145,50 | 148,35 | 151,50 |                                   |                                      |                                                       |
| <b>Temperatura<br/>(°C)</b>                          | His. | 22,54  | 1,07     | 18,00  | 21,80  | 22,50  | 23,40  | 25,80  | -                                 | Cercana a<br>temperatura<br>ambiente | Pacheco (2004)                                        |
|                                                      | Mon. | 24,01  | 0,84     | 22,70  | 23,40  | 23,95  | 24,52  | 25,70  |                                   |                                      |                                                       |

### ❖ *Turbiedad*

La turbiedad en el agua es causada por partículas en suspensión o coloides que obstruyen la transmisión de luz a través del líquido, ésta puede ser generada por materia orgánica o inorgánica o una combinación de las dos. Los microorganismos (bacterias, virus y protozoos) son típicamente asociadas a las partículas, razón por la cual la eliminación de la turbiedad en el proceso de filtración se asocia a la reducción significativa de la contaminación microbiana en el agua tratada (Montoya et al., 2011; WHO 2011); por lo anterior, la turbiedad es una de las variables básicas a ser monitoreados en cualquier PTAP, ya que esta variable puede interferir con la eficiencia de la desinfección y tener un impacto negativo en la aceptabilidad por parte del consumidor (WHO 2011). La Figura 6.1 presenta el comportamiento de datos históricos y de monitoreo de la turbiedad del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino.



**Figura 6.1** Comportamiento de la Turbiedad del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos

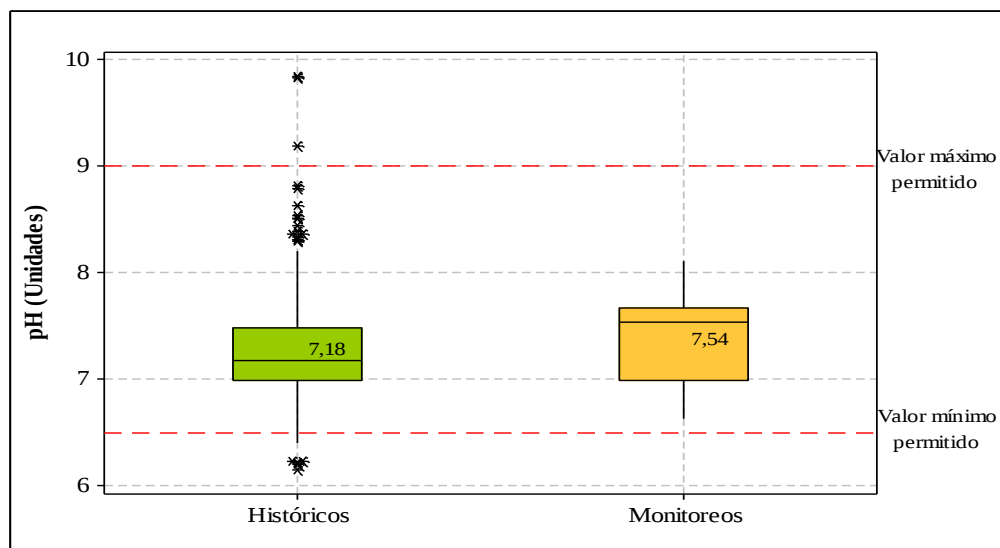
Al comparar los datos históricos con los de monitoreo se observa que el comportamiento de ambos grupos es similar, con un promedio de  $0.36 \pm 0.2$  y  $0.29 \pm 0.23$  respectivamente. A excepción del valor histórico atípico que excede por poco al valor máximo permitido en la norma Colombiana, el resto de los datos de turbiedad del agua no superan el límite máximo admisible de 2 UNT establecido en la resolución 2115 de 2007 pese al uso de la cal hidratada en el proceso de ajuste del pH del agua, cuya aplicación –como ya se ha comentado hasta aquí- puede elevar el valor de esta variable (Montoya et al., 2011).

De acuerdo con (Montoya et al., 2011), los bajos valores de esta variable en el agua tratada reflejan la reducción de la turbiedad que se logra en las etapas anteriores del proceso de potabilización; teniendo en cuenta además que la filtración –etapa previa a la cloración- es la última en la que se puede alcanzar la reducción de la turbiedad en la PTAP de Puerto Mallarino, el efluente del proceso de filtración por lo tanto debe estar por debajo del límite establecido en la normatividad colombiana, es decir, por debajo de las 2 UNT.

Además del cumplimiento de la normatividad, los datos están cumpliendo con las guías de calidad de agua para consumo humano de la World Health Organization (WHO, 2011), las cuales establecen que las aguas de consumo humano deben tener preferentemente valores iguales o menores a 1 UNT y en ningún caso más de 5 UNT; sin embargo la WHO (2011) sugiere además que para una mayor efectividad en la desinfección, las grandes PTAP deberían poder alcanzar una turbiedad de 0.5 UNT o menos en la filtración, mientras que la EPA (2014) hace una recomendación más estricta y sugiere que son preferibles valores de turbiedad menores a 0.1 UNT para garantizar así la remoción de *Cryptosporidium* en la PTAP; de acuerdo con esta última recomendación, no hay cumplimiento de los valores históricos y de monitoreo.

### ❖ pH

Si bien el pH del agua no tiene un impacto directo en los consumidores, este es una de las variables operacionales más importantes relacionadas con la calidad del agua. El valor de este parámetro sufre modificaciones a través de las distintas etapas de potabilización, donde los valores de pH del agua desinfectada usualmente son menores a 7.0 unidades y pueden contribuir a la corrosión en el SDA (Schock, 2002; WHO, 2011); por lo anterior, uno de los principales propósitos para controlar el pH en un SAAP es reducir al mínimo la corrosión en el SDA (CONAGUA, 2007), llevándose a cabo el ajuste final del pH después de la etapa de desinfección para cumplir además con lo recomendado en la normativa nacional. El comportamiento del pH se presenta a continuación, en la Figura 6.2.



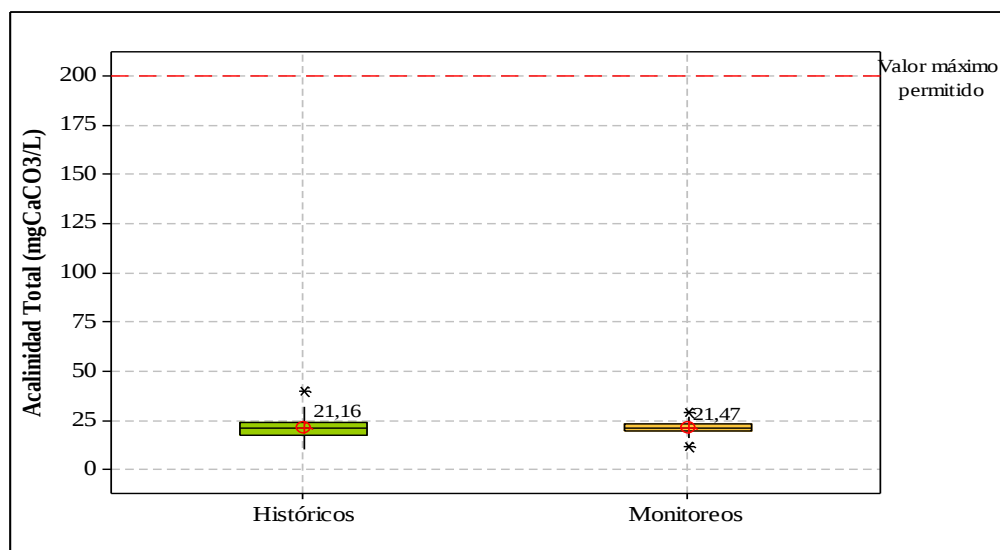
**Figura 6.2** Comportamiento del pH del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino:  
Datos históricos y de monitoreos

Como se evidencia en la Figura 6.2, el comportamiento del pH del agua tratada comparando los datos históricos con los obtenidos en los monitoreos es muy similar; las medianas de ambos casos difieren en menos de 0.4 unidades. El rango para los datos históricos -sin considerar los valores atípicos- va de 8.21 unidades a 6.40 unidades mientras que los valores máximos y mínimos para los datos de monitoreos son 8.11 unidades y 6.63 unidades; éstos presentan una clara similitud,

por lo que puede decirse que el comportamiento actual del pH del agua tratada es consecuente con el comportamiento histórico de éste. Al cotejar con el rango de pH establecido en la Resolución 2115 de 2007, el 100% y más del 99% de los valores registrados en los monitoreos y en los datos históricos respectivamente se encuentran comprendidos en el rango 6.5 – 9.0 unidades cumpliendo con la misma (MPS/MAVDT; 2007) y también en el rango de 6.5 – 8.5 unidades que según WHO (2011) es el rango de pH óptimo del agua que deja la PTAP e ingresa al SDA con el fin de minimizar la corrosión en éste; pese a lo anterior, a excepción de unos pocos valores históricos atípicos, los datos no cumplen con el pHs (8,7-9,0 unidades) del agua tratada en la PTAP hallado por Bueno et al. (2014), lo cual no favorece la formación de la película protectora en el SDA.

### ❖ *Alcalinidad total*

La alcalinidad del agua se debe generalmente a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos y con menos frecuencia a boratos, silicatos y fosfatos (Fernández, 2012); este parámetro está relacionado directamente con los fenómenos de corrosión y de incrustación en el SDA, ya que concentraciones bajas de alcalinidad favorecen la solubilidad del  $\text{CO}_2$ , incrementando la agresividad de las aguas (Trujillo et al., 2008). La representación de las alcalinidades totales históricas y de las registradas en los monitoreos se presenta en la Figura 6.3.



**Figura 6.3** Comportamiento de la Alcalinidad Total del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos

De acuerdo con los datos evaluados para la PTAP Puerto Mallarino, se observa que en general ambos grupos de datos mostraron ser afines, con una diferencia de 0.31  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$  entre sus promedios:  $21.16 \pm 4.99$  y  $21.47 \pm 3.63$  y en general con poca dispersión en su distribución.

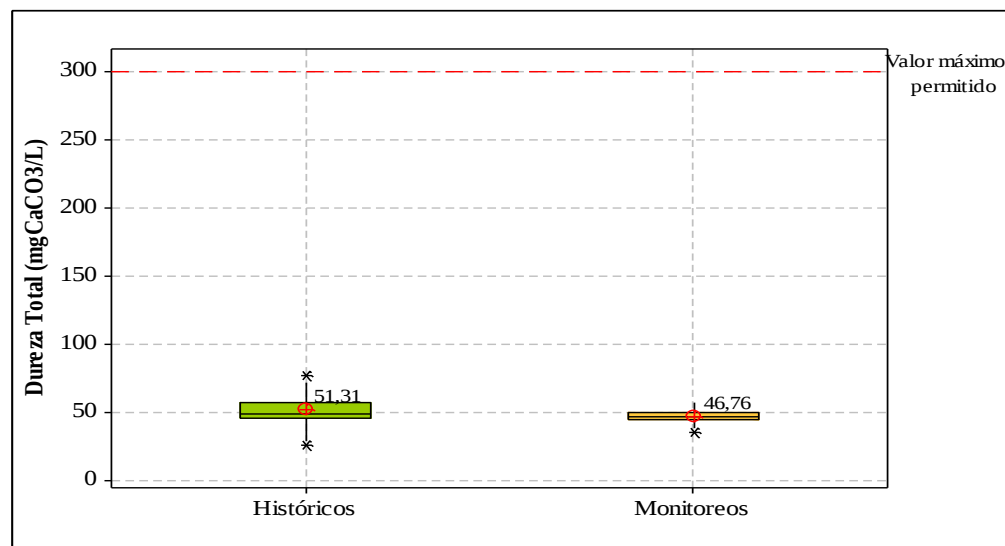
Teniendo en cuenta que la alcalinidad del agua cruda del río Cauca presenta valores medios de (27.15 - 30,72)  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$  al momento de ser captada por la PTAP de Puerto Mallarino (Torres et al., 2010; EMCALI, 2013) y que el valor de esta variable se ve disminuido debido a los

distintos procesos a los que es sometida el agua para su potabilización, como es el caso del proceso de desinfección cuya adición de cloro gaseoso tiende a disminuir la alcalinidad del agua (FSC Architects & C Engineers, 2003; Gramajo, 2004), la adición de cal hidratada en el proceso de ajuste de pH que se lleva a cabo en la PTAP para ayudar a incrementar de nuevo este parámetro es muy importante, permitiendo disminuir el carácter corrosivo del agua.

Pese a lo anterior, puede concluirse que si bien en general esta variable cumple con la normatividad colombiana ya que el 100% de los datos no sobrepasa el valor máximo establecido en la resolución 2115 de 2007 el cual es de 200 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ; más del 75% de los valores de alcalinidad con que el agua deja la PTAP son más bajos incluso que la alcalinidad promedio del agua cruda que ingresa a ésta. De acuerdo con Gray (2008), valores de alcalinidad por debajo de 50 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  -como es este el caso- sugieren una tendencia corrosiva del agua, lo cual es ratificado por autores como Merrill y Sanks (1977) y WHO (2011) que consideran que la alcalinidad debe superar los 40 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  para facilitar la formación de la película de  $\text{CaCO}_3$  y permitir así un mejor control de la corrosión en el SDA.

#### ❖ Dureza total

La dureza total del agua es producida especialmente por las sales de Calcio y Magnesio presentes en esta y algunas veces otros cationes divalentes como estroncio, hierro y manganeso también contribuyen a la dureza, aunque en menor grado (Rodríguez, 2010). De acuerdo con la Figura 6.4 se observa que esta variable se mantuvo tanto para datos históricos como para datos de monitoreos entre mínimos de (25,88 y 35,40) mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  y máximos de (76,92 y 57,00) mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  y con valores promedio de  $51.31 \pm 9.08$  mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  y  $46.75 \pm 4.12$  mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  respectivamente; con una diferencia entre los valores medios que no supera los 5 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ .



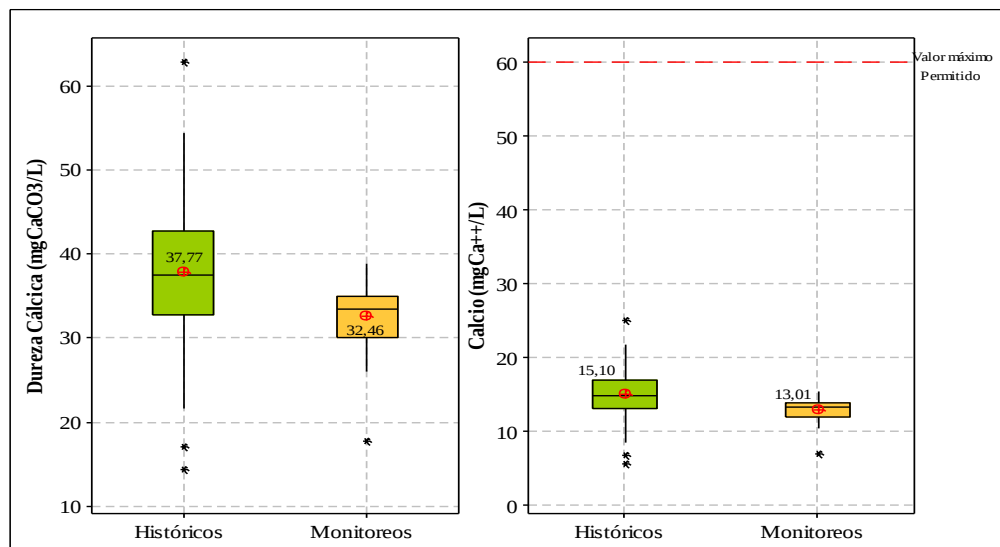
**Figura 6.4** Comportamiento de la Dureza Total del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos

Lo anterior indica, por un lado, que el 100% de los datos de dureza total del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino no superan el límite máximo admisible (300 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ) establecido en la resolución 2115 de 2007, cumpliendo de esta manera con la normatividad colombiana y asegurando un agua que no representa riesgo de incrustación en los SDA (WHO, 2011); por otro lado y teniendo en cuenta que -al igual que la alcalinidad- la dureza del agua es un parámetro determinante en la capacidad corrosiva o incrustante de ésta (De Sousa et al., 2010), puede concluirse que el agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino al no presentar valores de dureza por encima de 200mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ , no genera problemas de aparición de incrustaciones en el SDA, ni un consumo excesivo de jabón o problemas en el sabor por parte de los consumidores del líquido (WHO, 2011); sin embargo, autores como Neira (2006) mencionan que aguas cuya dureza total es inferior a 100 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  puede tener una capacidad amortiguante reducida y resulta, por lo tanto, más corrosiva para las tuberías, mientras que NHMRC (2004) y WHO (2011) plantean que la dureza total mínima para prevenir la corrosión es de 60 mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ; finalmente, el RAS (2000) expone que el agua ideal debe presentar una dureza total con valores entre 40-60 mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ .

De acuerdo con lo anterior, alrededor del 75% y del 99% de los valores de dureza total histórica y de monitores se encuentran entre los valores recomendados por el RAS (2000).

#### ❖ *Calcio y dureza cálcica*

La Figura 6.5 presenta el comportamiento del calcio y de la dureza cálcica del agua tratada durante el periodo histórico, así como durante el periodo de monitoreo.



**Figura 6.5** Comportamiento del Calcio y la dureza cálcica del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos

Los iones calcio son uno de los componentes químicos más importantes presentes en las aguas de consumo público y constituyen el mayor porcentaje de lo que se conoce como dureza total. Si

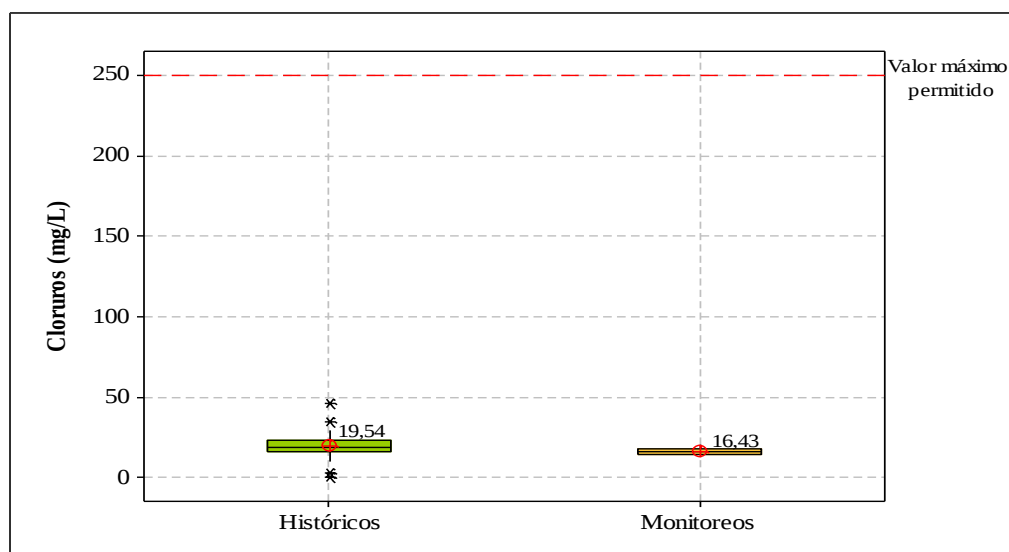
bien los compuestos de calcio no son fácilmente solubles en el agua, la presencia de  $\text{CO}_2$  aumenta rápidamente su solubilidad pudiéndose encontrar en las aguas potables en un rango de 5 a 500 mg/L en la forma de  $\text{CaCO}_3$ , (2-200 mg/L, como  $\text{Ca}^{++}$ ) (Neira, 2006).

La presencia de calcio en el agua como elemento y compuesto químico tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud (MPS/MAVDT, 2007); por encima de los 100  $\text{mgCa}^{++}/\text{L}$  le confiere sabor al agua (Neira, 2006); de este modo la norma colombiana establece un valor máximo aceptable de 60  $\text{mgCa}^{++}/\text{L}$  en la resolución 2115 de 2007. Este valor máximo admisible no se ve superado por los datos evaluados, ya que se tienen para los datos históricos y de monitoreo un promedio de  $15.10 \pm 3.3 \text{ mgCa}^{++}/\text{L}$  Ca y  $13.01 \pm 1.8 \text{ mgCa}^{++}/\text{L}$  y valores máximos aproximados a 25  $\text{mgCa}^{++}/\text{L}$ , por lo que se concluye que el 100% de los valores de calcio analizados cumplen con la norma colombiana, garantizando así que los consumidores no tengan problemas para llevar a cabo las tareas cotidianas de limpieza y que exista menor probabilidad de que se generen incrustaciones en el SDA, las cuales son consecuencias de un agua dura o un agua con altos valores de Calcio (Skipton y Dvorak, 2009).

Pese a lo anterior y al aporte que se hace a esta dureza cálcica con la aplicación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en el proceso de ajuste de pH que se lleva a cabo en la Planta Puerto Mallarino, los valores (el 100% de los datos de monitoreo y alrededor del 65% de los históricos) -al igual que con la alcalinidad- no alcanzaron los 40  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$  que de acuerdo con Merrill y Sanks (1977), Letterman (2001) y WHO (2011) es el mínimo recomendable en un rango que va hasta 60  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$  para contribuir a la disminución de la corrosión en el SDA.

#### ❖ Cloruros

Los cloruros evaluados para el agua tratada en la Planta Puerto Mallarino se representan en la Figura 6.6.



**Figura 6.6** Comportamiento de los cloruros del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos

Los cloruros pueden hacer de un agua potable un agua agresiva, ya que éstos por rompimiento de las barreras protectoras en la superficie del SDA abren camino a la corrosión, contribuyendo así con la ocurrencia de este fenómeno (MILACRON, 2004). La figura anterior permite observar que el comportamiento de esta variable durante las distintas jornadas de monitoreo fue similar al comportamiento histórico de ésta; si bien la media y mediana obtenidas en los monitoreos fueron menores, la diferencia entre éstas y los datos históricos estuvo tan solo alrededor de 3mg/L.

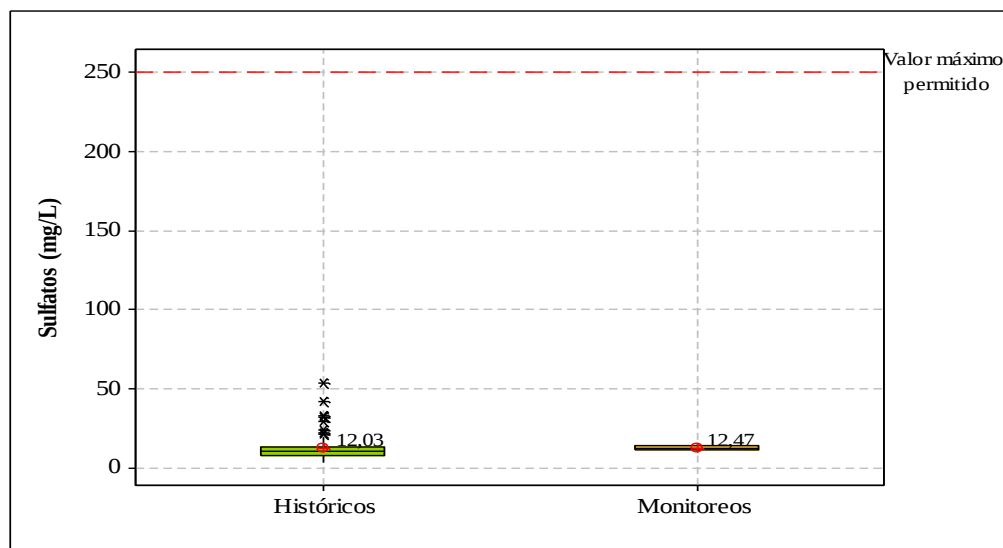
Esta presencia de cloruros en el agua tratada se puede deber por un lado a las sales de cloruro presentes en el agua cruda, cuyas concentraciones en el río Cauca tienden a ser bajas, alrededor de un promedio histórico de 5,78 mg/L para el agua cruda (años 2011-2012), los cuales son menores a los 10,20 mg/L que evaluó Torres et al. (2010); por otro lado, la presencia de cloruros en el agua tratada se debe también a las reacciones producidas al momento de la adición del cloruro férrico en la etapa de coagulación y a la adición de cloro en la etapa de desinfección, que generan un incremento en la concentración de cloruros respecto al agua cruda (Orellana, 2005; Fernández, 2012), dando lugar a valores más altos de esta variable en el agua tratada que en más del 99% de los casos estuvieron por encima de los 5,78 mg/L.

Pese a este incremento en el valor de los cloruros, es claro que los datos medidos en todas las jornadas de monitoreo, así como los valores históricos los cuales tuvieron valores mínimos y máximos que oscilan entre 14.60 y 0,29 mg/l y 20.16 y 45.87 mg/l con promedios de  $16.43 \pm 2.26$  y  $19.53 \pm 5.73$  respectivamente, cumplen todos con la norma colombiana para la cual esta variable debe estar en concentraciones menores a 250 mg/L (MPS/MAVDT, 2007). El no superar el límite de este parámetro es importante pues su exceso –como ya se mencionó previamente– puede incrementar la tasa de corrosión en el SDA (Vera, 2007; WHO, 2011) y además puede generar también cambios en el sabor del líquido (WHO, 2011). Los valores son incluso menores a los 50 mg/L que MILACRON (2004) propone como el límite para considerar un agua agresiva o no respecto a los cloruros.

### ❖ *Sulfatos*

Los sulfatos, al igual que los cloruros, en altas concentraciones pueden producir un sabor apreciable y contribuir a la corrosión de los SDA (WHO, 2011). Para los sulfatos del agua tratada de la PTAP Puerto Mallarino el comportamiento medido en el monitoreo fue muy similar al comportamiento histórico de este parámetro como se evidencia en la Figura 6.7.

La diferencia entre la media de datos históricos y de monitoreo fue incluso menor que para los cloruros -no superando los 0.5 mg/L-, pues se obtuvieron promedios de  $12.03 \pm 7.29$  y  $12.47 \pm 1.81$  respectivamente, así como valores mínimos y máximos que oscilan entre 3.61 y 19,29 mg/l para los datos históricos y entre 10,00 y 14.90 correspondientes a los monitoreos. Esta presencia de sulfatos registrados en el agua tratada se puede deber en gran medida a las sales de sulfato que se encuentran en el agua cruda (que para los años 2011-2012 tuvieron un promedio de  $15,54 \pm 6,7$ ) y que no son removidas en el tratamiento de agua convencional (NHMRC, 2004).



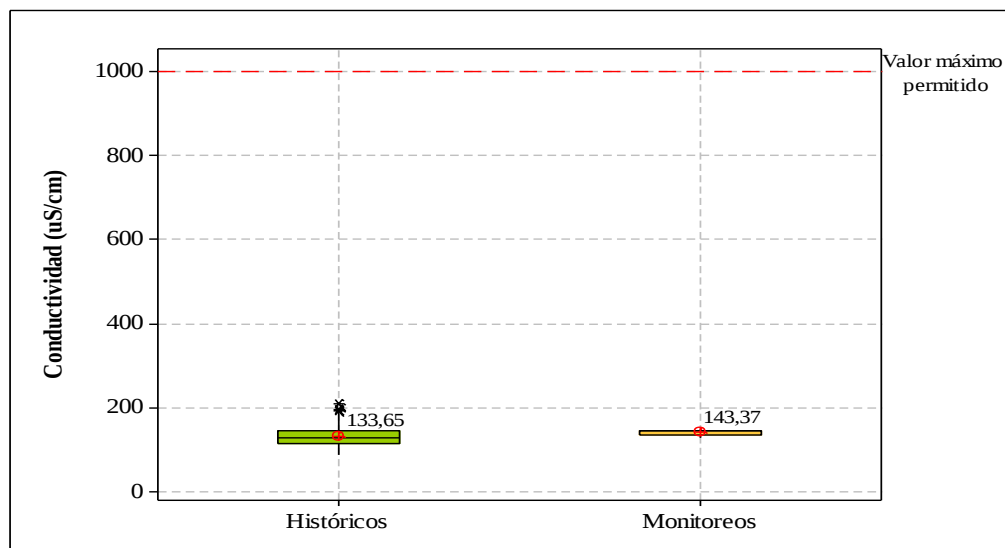
**Figura 6.7** Comportamiento de los Sulfatos del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos

Finalmente, al igual que para los cloruros, el 100% de los datos cumplen con la resolución 2115 de 2007 cuya concentración no debe sobrepasar los 250 mg/L (MPS/MAVDT, 2007); el superar estos límites puede generar problemas en cuanto a un sabor más amargo del agua afectando así la aceptabilidad de ésta (NHMRC, 2004; Skipton et al., 2010; WHO, 2011), puede además tener un efecto laxante temporal y contribuir a la generación de incrustaciones en el SDA (Skipton et al., 2010).

### ❖ Conductividad

Una alta concentración de sólidos disueltos usualmente se asocia con altas concentraciones de iones que incrementan la conductividad del agua (Schock, 2002). Respecto a este parámetro se observó (Figura 6.8) similitud en el comportamiento de los datos de monitoreo y los datos de conductividad históricos con una diferencia entre las conductividades medias menor a 10 uS/cm, siendo mayor la obtenida para los datos históricos. La adición de químicos en el tren de tratamiento incrementa los valores de esta variable ya que el promedio histórico (2011-2012) de la conductividad para el agua cruda es  $99,30 \pm 21,72$ , mientras que el promedio para el agua tratada es de  $133,65 \pm 20,74$ .

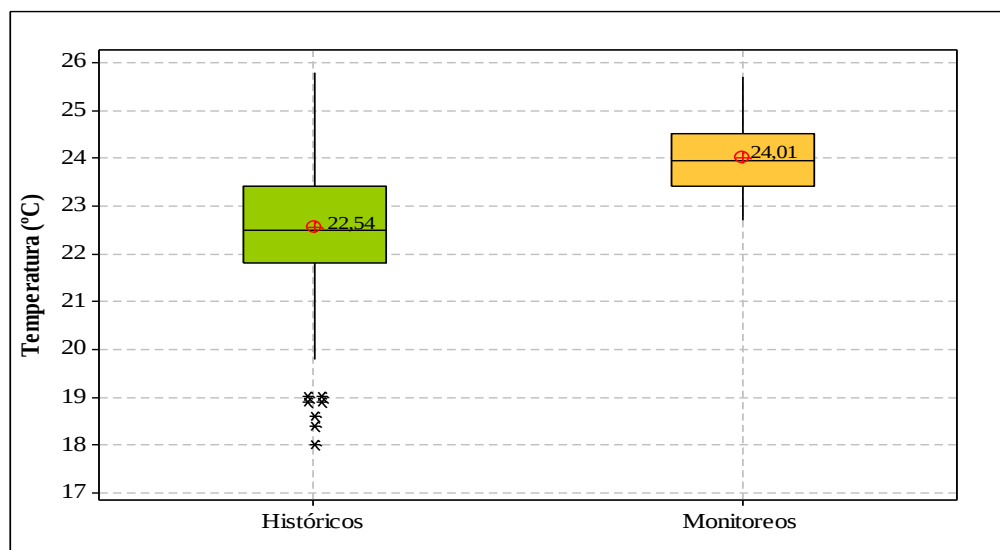
Claramente el 100% de los datos de ambos grupos cumplen con el valor máximo establecido en la normatividad colombiana; lo anterior es muy importante ya que el incremento de la conductividad aumenta a su vez la capacidad del agua para completar el circuito electroquímico y conferirle a ésta una tendencia corrosiva; de igual manera los sólidos disueltos pueden afectar la formación de la película protectora dependiendo de su naturaleza particular. Si son los sulfatos y cloruros los mayores contribuyentes de sólidos disueltos es probable que se incremente la corrosividad del agua hacia tuberías de materiales a base de hierro (Schock, 2002).



**Figura 6.8** Comportamiento de los Sulfatos del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos

#### ❖ *Temperatura*

La temperatura influye sobre las propiedades físicas, la velocidad de las reacciones químicas y la solubilidad de los gases, la formación de  $\text{CaCO}_3$ , el desarrollo de los organismos presentes, los colores, olores y sabores del agua -puesto que el agua fría tiende a ser más agradable al paladar que el agua caliente- (SENA, 1999; AMTA, 2010, WHO, 2011), así como también influye en las incrustaciones y corrosividad en el SDA (CONAGUA, 2007; García, 2010). La Figura 6.9 presenta el comportamiento de esta variable.



**Figura 6.9** Comportamiento de la Temperatura del agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino: Datos históricos y de monitoreos

De acuerdo con la figura anterior, se observa que la temperatura media de los datos históricos ( $22,54 \pm 1,07$ ) es menor en alrededor de  $1,5^{\circ}\text{C}$  comparada con la obtenida en el periodo de monitoreo ( $24,01 \pm 0,84$ ), lo cual es justificado en el hecho de que la temperatura del agua y especialmente si se trata de aguas superficiales, es variable en función del año y de las distintas épocas de este (CONAGUA, 2007).

En general las temperaturas en todos los casos estuvieron por debajo de los  $26^{\circ}\text{C}$  y por encima de los  $19,8^{\circ}\text{C}$  y  $22,0^{\circ}\text{C}$  para las temperaturas históricas y monitoreadas respectivamente. Pese a los más altos valores de temperatura registrados cercanos a los  $26^{\circ}\text{C}$ , éstos nunca fueron  $5^{\circ}\text{C}$  mayores a la temperatura ambiental de la ciudad de Cali que durante el año 2011 tuvo una temperatura media de  $23,4^{\circ}\text{C}$ , para el 2012 fue de  $23,7^{\circ}\text{C}$  y finalmente en el periodo de monitoreo tuvo un promedio cercano a los  $24,0^{\circ}\text{C}$  (IDEAM, 2014).

Además de lo anterior, es recomendable mantener la temperatura del agua tratada cercana a la temperatura ambiente, ya que si ésta es muy alta o muy baja puede ser rechazada por el consumidor al no encontrarla agradable (Pacheco, 2004). WHO (2011) manifiesta que lo ideal es que ésta esté por debajo de los  $25^{\circ}\text{C}$  porque el agua fría, además de tener mejor sabor, es más efectiva para prevenir el crecimiento de microorganismos en el SDA y disminuir la corrosión; de acuerdo con lo anterior, el 86.7% de los datos registrados en el periodo de monitoreo cumplen con esta recomendación, mientras que en el caso de los datos históricos el 99.5% de las temperaturas es inferior a los  $25,0^{\circ}\text{C}$ . Los datos restantes sobrepasan este límite por menos de  $1,0^{\circ}\text{C}$ .

En general, todas las variables evaluadas para el agua tratada del río Cauca por la Planta Puerto Mallarino cumplen con la normatividad colombiana; pese a esto, no todas las variables están dentro de los rangos recomendados internacionalmente con el fin de disminuir la tendencia corrosiva del agua que deja la PTAP e ingresa en el SDA; estas variables son la alcalinidad total y el contenido de Calcio (dureza cálcica), mientras que el pH tampoco alcanza el rango de pHs recomendado.

## 6.2.2 Etapa V, VI y VII: Evaluación de los alcalinizantes NaOH y $\text{NaHCO}_3$ con el agua clorada del río Cauca (ensayos de dosificación)

De acuerdo con el ítem 6.1 se escogieron el NaOH y el  $\text{NaHCO}_3$  para llevar a cabo los ensayos de dosificación. La Tabla 6.4 presenta las características de las soluciones preparadas con estos alcalinizantes.

**Tabla 6.4** Características de las soluciones de NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  utilizadas en los ensayos de dosificación

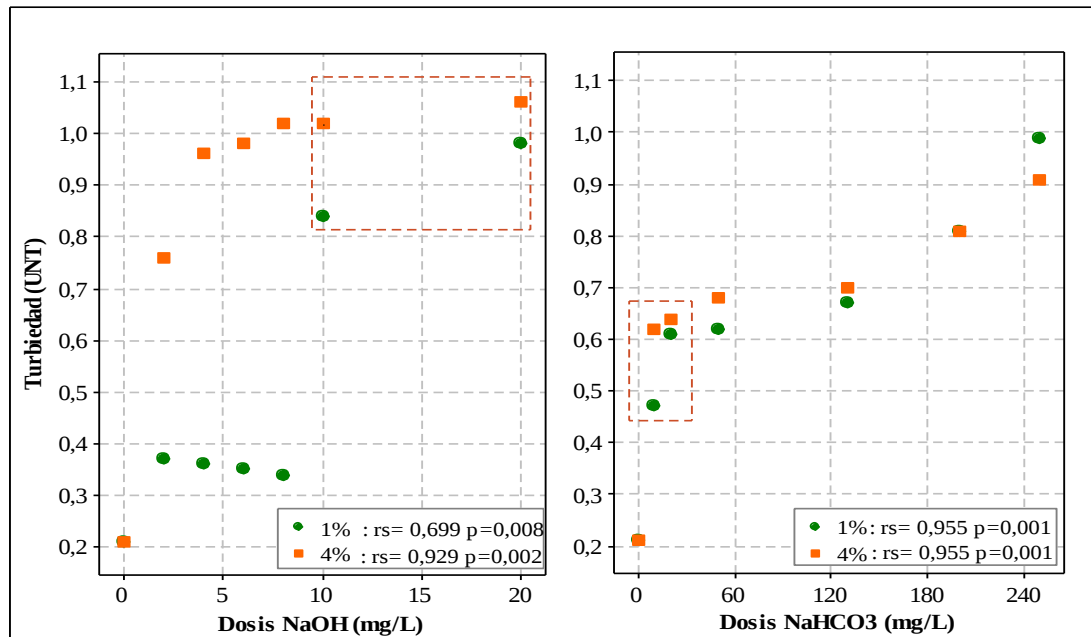
| CARACTERÍSTICA                               | SOLUCIÓN<br>DE NaOH 1% | SOLUCIÓN<br>DE NaOH 4% | SOLUCIÓN<br>DE $\text{NaHCO}_3$<br>1% | SOLUCIÓN<br>DE $\text{NaHCO}_3$<br>4% |
|----------------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Concentración (g/L)                          | 12.52                  | 45.90                  | 8.63                                  | 34.60                                 |
| pH (Unidades)                                | 12.39                  | 12.14                  | 8.77                                  | 8.46                                  |
| Alcalinidad total<br>(mg $\text{CaCO}_3$ /L) | 15396                  | 61815                  | 5135                                  | 20605                                 |

Los valores obtenidos para las variables evaluadas después de los ensayos de dosificación se presentan en el Anexo 10.2 y Anexo 10.3. El resumen del análisis estadístico por medio de indicadores de tendencia central, de dispersión y posición se presentan en el Anexo 10.6. En esta etapa por medio de dichos resultados se hizo un análisis estadístico de correlación (Coeficiente de Spearman  $r_s$ ) entre las variables en estudio: Turbiedad, pH, alcalinidad total, dureza total, calcio, cloruros, sulfatos, sodio, conductividad, temperatura y las dosis aplicadas de NaOH y  $\text{NaHCO}_3$ , así como pruebas estadísticas para identificar diferencias significativas; se evaluó el cumplimiento de la normatividad Colombiana (Resolución 2115 de 2007) para las variables, así como también se evaluó qué tan favorable resulta la condición del agua para la formación de la película protectora en el SDA después de la dosificación de los alcalinizantes, lo cual se hizo mediante la determinación de los valores del Índice de Saturación de Langelier (ISL), Calcio y Alcalinidad y la relación alcalinidad/ $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ , tomando como apoyo recomendaciones hechas por autores como Merrill y Sanks (1977); RAS (2000); Esvelt (2010); WHO (2011), entre otros, los cuales sugieren valores adecuados que deben tener las variables aquí analizadas para el ajuste del pH del agua.

#### ❖ *Análisis estadístico y cumplimiento de los parámetros con la norma Colombiana*

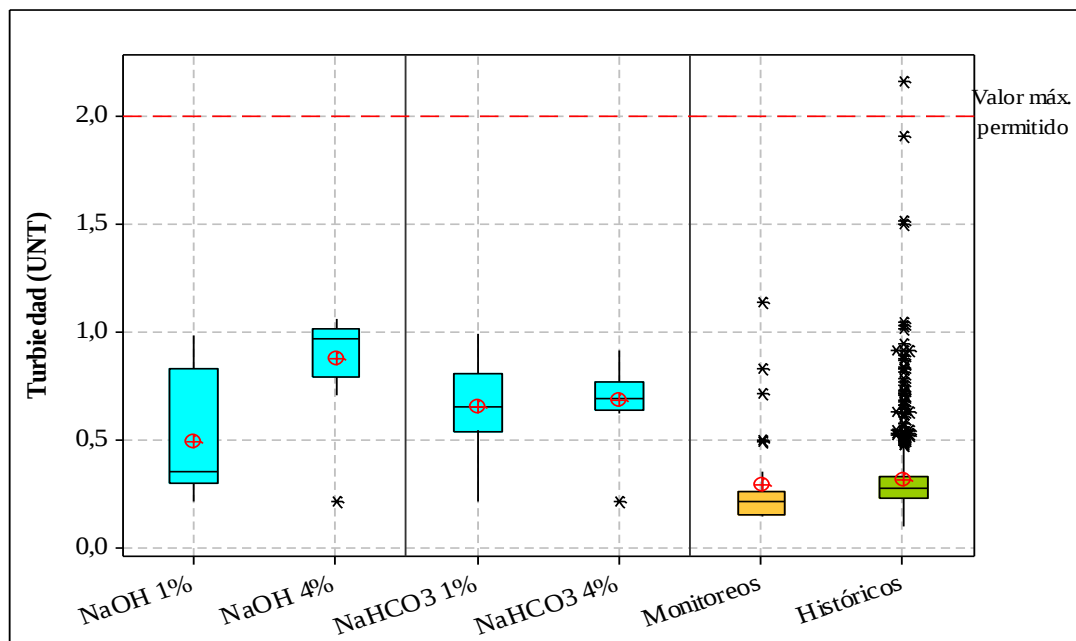
##### *Turbiedad*

En la Figura 6.10 se observa que existe una correlación entre las dosis de los alcalinizantes y la turbiedad; el coeficiente de Spearman toma valores altos cercanos a +1 con valores de significancia  $< 0,05$ , lo que indica que existe una dependencia entre estas variables y puede inferirse que cuando se aumentan las dosis de NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  a concentraciones tanto del 1% como del 4%, la turbiedad del agua aumenta.



**Figura 6.10** Correlación entre la dosificación de NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  y la turbiedad

Sin embargo se evidencia también que al aplicar las dosis más bajas del NaOH a una concentración del 1%, la turbiedad se mantiene con valores bajos y el incremento de ésta se aprecia con las dosis de 10 y 20 mg/L, mientras que al aplicar el NaOH al 4% se presenta un aumento acelerado en la turbiedad a partir de las dosis más bajas; lo anterior se corrobora al encontrarse diferencias significativas entre ambas concentraciones (Anexo 10.9 A) donde la mediana de la turbiedad generada por el NaOH al 4% es más del doble de la generada por el NaOH al 1%; lo anterior no se refleja de igual manera con el  $\text{NaHCO}_3$ , con el cual se aprecia un comportamiento de la turbiedad similar con ambas concentraciones no encontrándose diferencia significativa entre estas. Este último alcalinizante parece presentar un mejor comportamiento en cuanto a los resultados del parámetro en estudio, teniendo una distribución más simétrica de sus datos (Figura 6.11).



**Figura 6.11** Comparación de la turbiedad: Ensayos de dosificación-monitoreos-e históricos

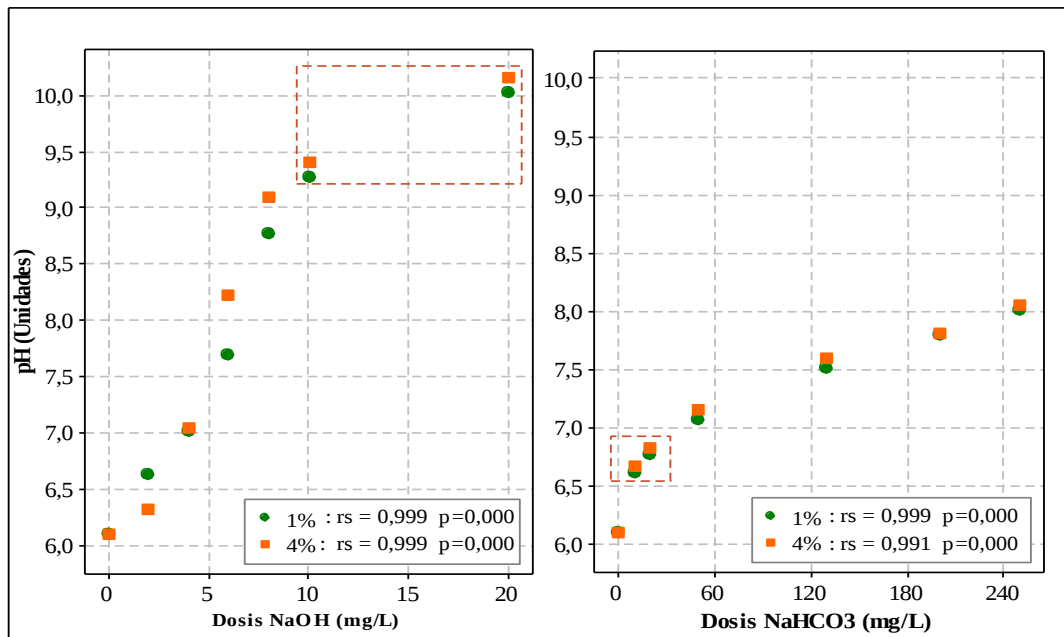
Comparando la turbiedad de los dos alcalinizantes al aplicar las dosis de 10mg/L y 20mg/l (dosis enmarcadas en los recuadros punteados), las cuales corresponden a las dosis en común usadas tanto con el NaOH y el  $\text{NaHCO}_3$ , se puede concluir que sí hay diferencias significativas entre ambos alcalinizantes (Anexo 10.11 A), siendo el NaOH el que produjo mayor incremento en la turbiedad del agua en alrededor de 0.4 UNT en comparación con las turbiedades generadas por la adición de  $\text{NaHCO}_3$ . En todos los casos el incremento en los valores de turbiedad del agua posterior a la adición de los alcalinizantes, está ligado al hecho de que incrementar el pH y especialmente cuando es por encima de 8.0 unidades (como es el caso del NaOH), conduce a la formación de hidróxidos metálicos, carbonatos básicos y óxidos que son relativamente insolubles y contribuyen a la turbiedad del agua (Esvelt, 2010; Rahman y Gagnon, 2013).

El Anexo 10.2, Anexo 10.3 y la Figura 6.10 evidencian también que si bien la adición de los alcalinizantes incrementa la turbiedad del agua, todos los valores obtenidos para ambos

alcalinizantes y en cualquier concentración al igual que los valores históricos y de monitoreo (ítem 6.2.1) estuvieron por debajo de 2 UNT, valor máximo aceptable en la Resolución 2115 de 2007 y por debajo de 1,0 UNT WHO (2011) (excepto tres valores generados por NaOH 4%), aunque cabe mencionar también que las turbiedades reportadas en los ensayos (promedios entre  $0,49 \pm 0,28$  y  $0,88 \pm 0,23$  UNT) fueron en general superiores comparadas con las históricas y de monitoreo analizadas (promedios 0,31 y 0,29 respectivamente) (Figura 6.11 y Anexo 10.6), siendo las dosis de 2-8 mg/L de NaOH al 1% (0,37-0,34 UNT) las que generaron una turbiedad más cercana a estos valores.

### pH

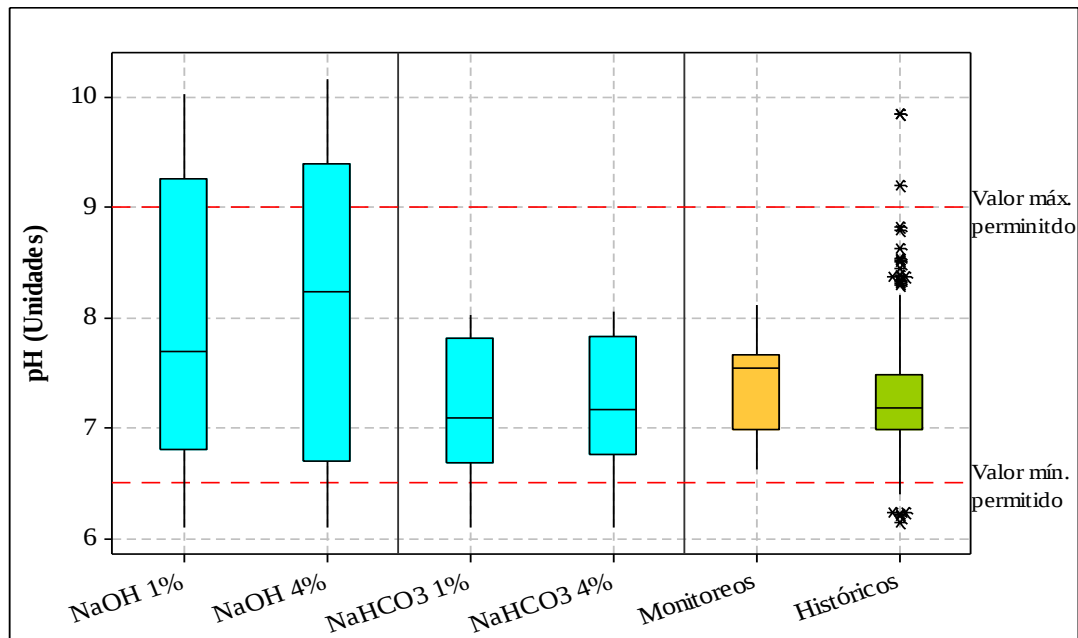
Al igual que para la turbiedad, en la Figura 6.12 se observa que existe una clara correlación entre la dosificación de los alcalinizantes y el pH del agua; el coeficiente de Spearman de nuevo toma valores muy cercanos a +1 (con significancias de 0,000) indicando una fuerte asociación entre la dosificación y dicha variable, es decir que cuando se aumentan las dosis de NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  el pH del agua tiende también a incrementar.



**Figura 6.12** Correlación entre la dosificación de NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  y el pH del agua

Al observar el comportamiento de cada alcalinizante a las distintas concentraciones, no se observa una diferencia en los valores de pH generados, lo cual se ratificó por medio de la prueba Mann - Whitney (Anexo 10.9 B) entre las concentraciones de 1% y 4% tanto para el NaOH como para el  $\text{NaHCO}_3$ , prueba que evidenció que no existen diferencias significativas entre estas. Por otra parte comparando ambos alcalinizantes, se aprecia que el incremento de las dosis del NaOH tiende a elevar de manera más drástica el pH del agua en comparación con el  $\text{NaHCO}_3$ , siendo las dosis de este último alcalinizante -en su mayoría- más altas en comparación con las del NaOH.

La Figura 6.13 permite visualizar además que el impacto del NaOH en el pH del agua presenta mayor variabilidad en comparación con el  $\text{NaHCO}_3$ . Al contrastar las dosis de 10 y 20 mg/L por medio de la prueba Kruskal Wallis (Anexo 10.11 B) se encontraron diferencias significativas entre ambos alcalinizantes, siendo claramente el NaOH el que generó valores de pH más elevados, -por encima de 9,0 unidades-, mientras que con el  $\text{NaHCO}_3$  el máximo pH obtenido fue de 8.06 unidades; por esta razón el  $\text{NaHCO}_3$  tiende a usarse no tanto para el ajuste de pH como si para el ajuste de la alcalinidad del agua donde su efecto es más evidente (Spencer et al., 2003; AMTA, 2010).



**Figura 6.13** Comparación del pH: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos

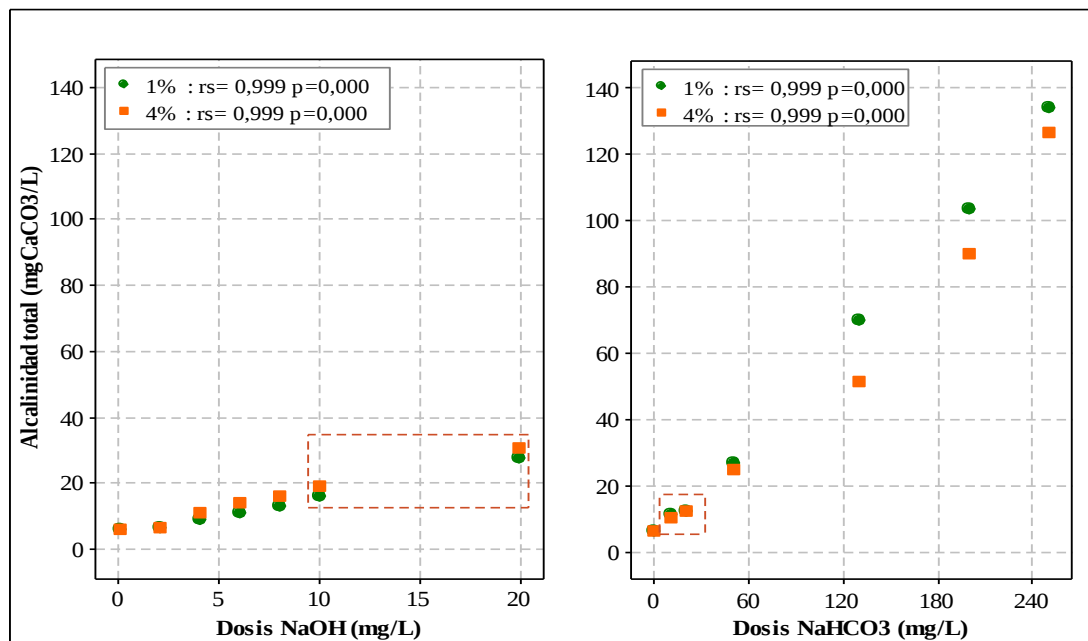
el pH que es un parámetro que juega un papel fundamental en la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  y por lo tanto que debe estar en un rango apropiado entre 6.5 – 9.0 unidades que permita la formación de carbonatos y la posterior película protectora en el SDA (Esvelt, 2010), a diferencia del parámetro anterior (turbiedad) puede observarse en la Figura 6.12, que este no estuvo dentro del rango estipulado por la resolución 2115 del 2007 para el NaOH en las dos dosis aplicadas (10mg/L y la de 20 mg/L) para una concentración del 1% y para las dosis 8mg/L, 10mg/L y 20 mg/L con una concentración del 4%. Lo anterior reafirma que el NaOH puede generar incrementos dramáticos en el pH del agua (AMTA, 2010); además, la dosis más baja de este alcalinizante al 4% generó un pH de 6,33 unidades en el agua que -aunque por poco-, se encuentra por debajo del límite mínimo establecido en la resolución 2115 de 2007. Por otro lado, todos los pH obtenidos con la dosificación de  $\text{NaHCO}_3$  tanto en concentraciones del 1% y 4% estuvieron dentro del rango que se establece en la norma colombiana.

La Figura 6.13 permite observar también que el 75% de los valores obtenidos con el  $\text{NaHCO}_3$  estuvieron por debajo de las 7,83 unidades, comportamiento similar a los valores de monitoreo e históricos, de los cuales el 75% estuvieron por debajo de las 7,67 y 7,48 unidades

respectivamente. El NaOH por su parte, dista más de este comportamiento ya que el 75% de los valores están por debajo de las 9,40 unidades. Los valores más conservadores con este último alcalinizante que se acercan más al comportamiento de históricos y monitores se obtienen con las dosis más bajas (2mg/L - 6 mg/L), adicionalmente, la dosis de 8mg/L del NaOH al 1% generó un pH (8,77 unidades) dentro del rango de pHs (8,7 – 9,0 unidades).

### *Alcalinidad total*

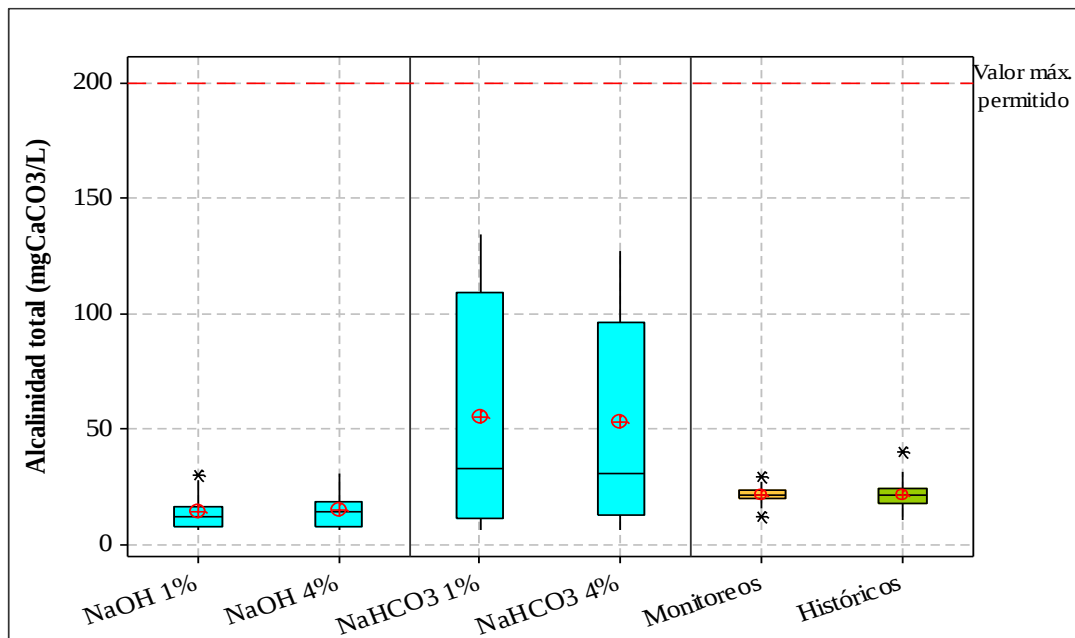
La Figura 6.14 presenta la correlación entre la dosificación de los alcalinizantes y la alcalinidad.



**Figura 6.14** Correlación entre la dosificación de NaOH y NaHCO<sub>3</sub> y la alcalinidad total

Por medio de la figura anterior se observa que la alcalinidad es otra de las variables cuyos valores fueron incrementando a medida que se incrementaron las dosis de los alcalinizantes; la clara correlación se expresa por medio del coeficiente de Spearman, el cual en todos los casos toma valores muy cercanos a +1, con valores de significancia de 0,000.

La adición de NaOH en ambas concentraciones (1% y 4%) generó alcalinidades muy similares, mientras que para el NaHCO<sub>3</sub>, si bien el comportamiento es el mismo en el sentido de que la alcalinidad se incrementa con el aumento de la dosis del alcalinizante, los ensayos con NaHCO<sub>3</sub> al 4% generaron alcalinidades algo menores en comparación con los resultados obtenidos para el 1%, pese a lo anterior no se identificaron diferencias significativas para las alcalinidades entre una concentración y otra de un mismo alcalinizante (Anexo 10.9 C y Figura 6.15 ).



**Figura 6.15** Comparación de la alcalinidad: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos

Al comparar la alcalinidad total generada en el agua clorada con la adición de los alcalinizantes, se determina que se alcanzaron alcalinidades más altas con el  $\text{NaHCO}_3$ , por supuesto teniendo en cuenta que con este alcalinizante se utilizaron en general mayores dosis que con el  $\text{NaOH}$ . Al contrastar las dosis de 10mg/L y 20mg/L por medio de pruebas estadísticas (Anexo 10.11 B y Anexo 10.13 A), se observa que hay diferencias significativas entre los valores de alcalinidad generados con uno u otro alcalinizante.

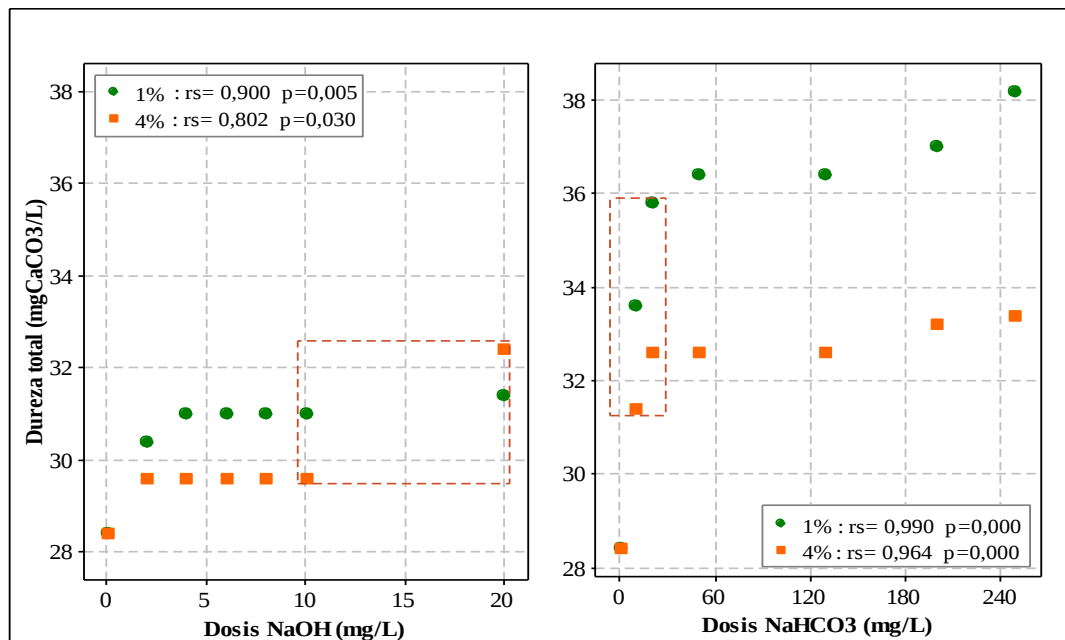
Respecto a lo anterior, la alcalinidad media generada por el  $\text{NaOH}$  es alrededor del doble de la alcalinidad obtenida con el  $\text{NaHCO}_3$ , esto debido a que el aporte que hace este producto a la alcalinidad del agua por cada 1mg/L adicionado fue alrededor de 1.20 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , valor muy cercano a los 1.25 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  mencionado por Birnhack et al. (2011) y un poco más lejano de los 1.55mg/L como  $\text{CaCO}_3$  mencionados por la EPA (2004) y NHMRC (2004); esta contribución a la alcalinidad del agua representa un aporte mucho mayor a los aproximadamente 0.2 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  que aportó el  $\text{NaHCO}_3$  por cada 1 mg/L de este adicionado, aporte inferior al esperado teóricamente de 0.6 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  (EPA, 2004; Birnhack et al., 2011).

Mientras que la alcalinidad total inicial del agua clorada fue de 6,3 mg/L, con la adición de  $\text{NaOH}$  se incrementó este valor hasta una alcalinidad máxima cercana a los 30mgCaCO<sub>3</sub>/L con la dosis de 20mg/L; con el  $\text{NaHCO}_3$  se llegó a una alcalinidad máxima de 134.2mg CaCO<sub>3</sub>/L con la más alta dosis de 250mg/L. Puede observarse que en todos los casos la alcalinidad no sobrepasó el límite máximo permitido en la resolución 2115 de 2007 el cual es de 200 mgCaCO<sub>3</sub>/L; pese a esto, es evidente que en los ensayos de dosificación con  $\text{NaOH}$  ninguno de los valores de alcalinidad llegó a 40mgCaCO<sub>3</sub>/L, que es el valor recomendado por Merrill y Sanks (1977), Esvelt (2010) y WHO (2011).

Estos bajos valores de alcalinidad donde el máximo obtenido fue de 31mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  para el NaOH, dificultan la precipitación del carbonato de calcio para la formación de la película protectora en el SDA indiferente de que tan alto sea el pH del agua (Esvelt, 2010), en este sentido el comportamiento de las alcalinidades obtenidas con el NaOH fue similar al de las alcalinidades históricas y de monitoreo; aunque estas últimas presentan valores más elevados, con alcalinidades medias que superan a las de los ensayos con NaOH en más de 6 mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ . Contrario a lo anterior, las mayores dosis de 130 mg/L, 200mg/L y 250 mg/L tanto con la concentración del 1% como del 4% del  $\text{NaHCO}_3$  sí permitieron generar valores de alcalinidad por encima de los 40 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ , solo las dosis más bajas de este alcalinizante (10-50mg/L) genera un comportamiento similar al de datos históricos y de monitoreo.

### *Dureza total*

Como se observa en la Figura 6.16, la dureza total es un parámetro cuya incremento después de la aplicación de los alcalinizantes respecto a la dureza total presente inicialmente en el agua, fue poco, especialmente con el NaOH; Pese a esto, de acuerdo con el coeficiente de Spearman que fue cercano a +1, se estima que existe una correlación entre las dosis aplicadas de los alcalinizantes y la dureza total generada en el agua.



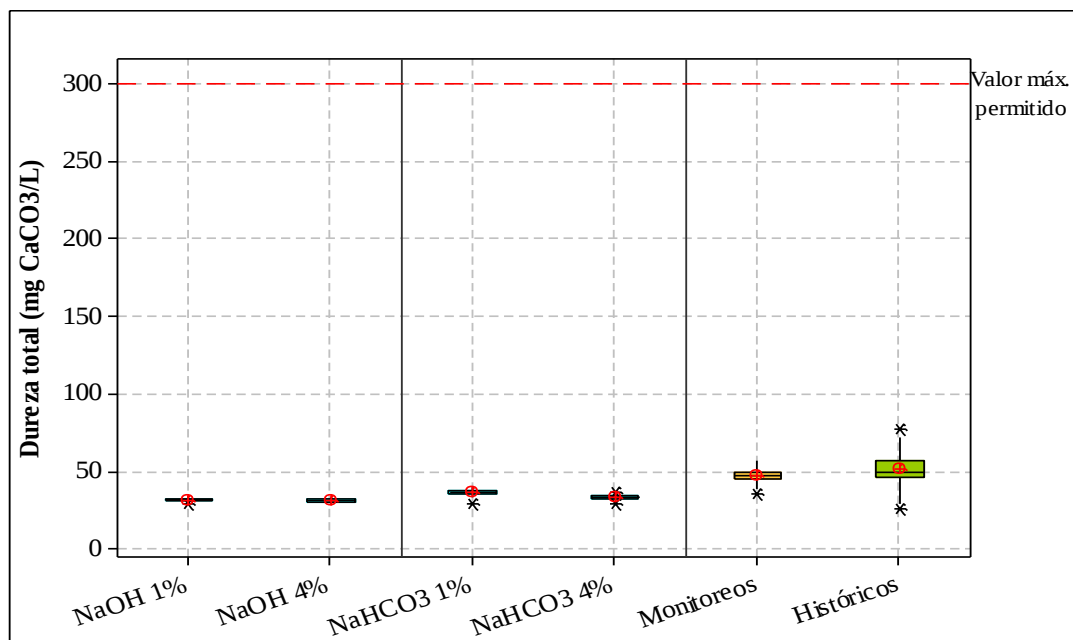
**Figura 6.16** Correlación entre la dosificación de NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  y la dureza total

De acuerdo con la prueba t-Student llevada a cabo (Anexo 10.8 A), para el NaOH no se identificó una diferencia significativa entre la dureza total generada por las dos concentraciones de este, mientras que con el  $\text{NaHCO}_3$  se determinó que la concentración al 1% generó durezas ligeramente mayores en comparación con la concentración al 4%. Este último alcalinizante parece presentar un mejor comportamiento en cuanto a la relación existente, es decir que al incrementar las dosis de este alcalinizante en la mayoría de los casos incrementa también la

dureza total, lo cual no es tan evidente con la adición de NaOH con el cual varios valores de dureza permanecieron constantes con algunas dosis de los alcalinizantes. Estos ligeros incrementos en la dureza del agua pueden deberse a la composición misma de los alcalinizantes, en el caso del NaOH aproximadamente 0,5 mg/L del alcalinizante corresponde a hierro (Fe) (QUIMPAC, 2014) que puede contribuir al leve incremento de esta variable; igual ocurre con la adición de  $\text{NaHCO}_3$  que contiene pequeños porcentajes de metales como hierro y aluminio y es un alcalinizante que contribuye a lo que se conoce como dureza carbonatada.

Según los valores obtenidos, se aprecia que existen diferencias en cuanto al efecto generado por ambos alcalinizantes sobre la dureza del agua; el  $\text{NaHCO}_3$ , cuyas dosis aplicadas fueron mayores que las del NaOH, exhibe una mayor variabilidad y valores más elevados en la dureza total del agua en comparación con este último alcalinizante. Al cotejar las dosis de 10 y 20 mg/L por medio de la prueba ANOVA, se encuentra diferencia entre el  $\text{NaHCO}_3$  al 1% y el resto de ensayos, siendo las durezas totales un poco más altas en comparación con las obtenidas para el NaOH a ambas concentraciones (Figura 6.17).

Mientras que la dureza total sin aplicar ningún alcalinizante fue de 28.4mgCaCO<sub>3</sub>/L, la máxima dureza alcanzada después de la aplicación de NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  fue de 32.4 mgCaCO<sub>3</sub>/L y 38.2 mgCaCO<sub>3</sub>/L respectivamente. El bajo incremento generado por estos alcalinizantes en la variable evaluada se debe principalmente al hecho de que estos no aportan cationes de calcio y/o magnesio (Manharawy y Hafez, 2002; Kim et al., 2008; Birnhack et al. 2011), los cuales son los mayores contribuyentes de la dureza del agua (WHO, 2011), por lo tanto el aporte de ambos alcalinizantes a esta parámetro es similar.

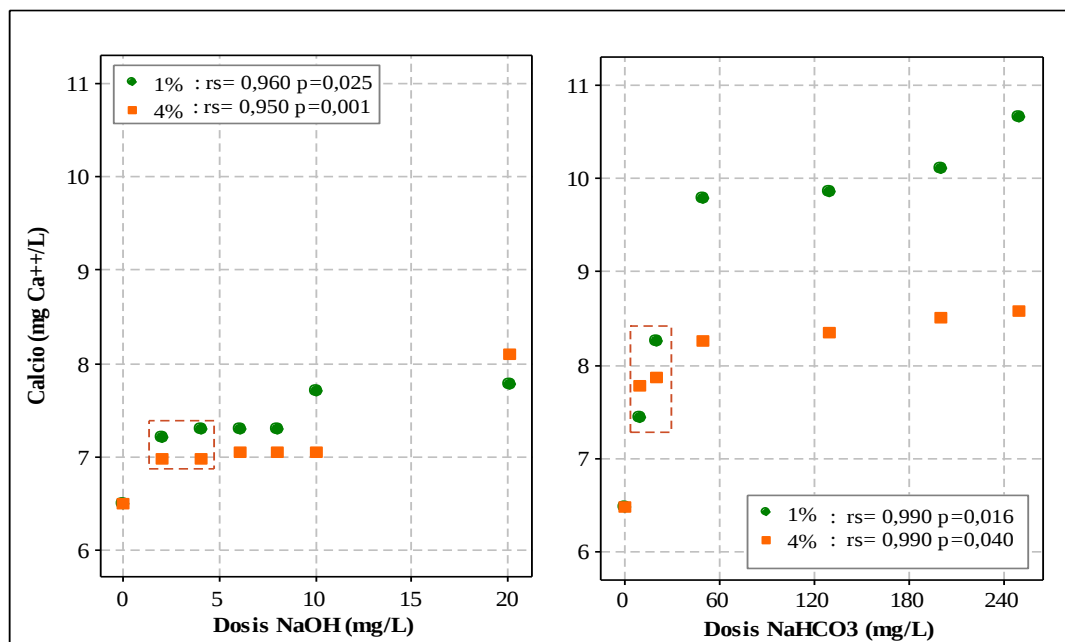


**Figura 6.17** Comparación de la dureza total: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos

Al igual que los valores de dureza total históricos y de monitoreos evaluados, las durezas totales reportadas en los ensayos de dosificación no superan el valor máximo de 300 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  permitido por la resolución 2115 de 2007; de igual manera no se alcanzaron valores siquiera de 60 mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$  recomendado por autores como NHMRC (2004) y WHO (2011) para prevenir la corrosión en el SDA. Con la Figura 6.17 es notorio también que las durezas totales tanto históricas como de monitoreos (con promedios ente 51,31 y 46,76 mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$  respectivamente) son superiores a las alcanzadas en los ensayos (con promedios que no superan los 35,89± 2,72 mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ), esto es de esperarse ya que el alcalinizante usado por la PTAP, correspondiente a los datos históricos y de monitoreos reportados, es  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  el cual contribuye con cationes de  $\text{Ca}^{++}$  al agua aportando así a la dureza total de esta.

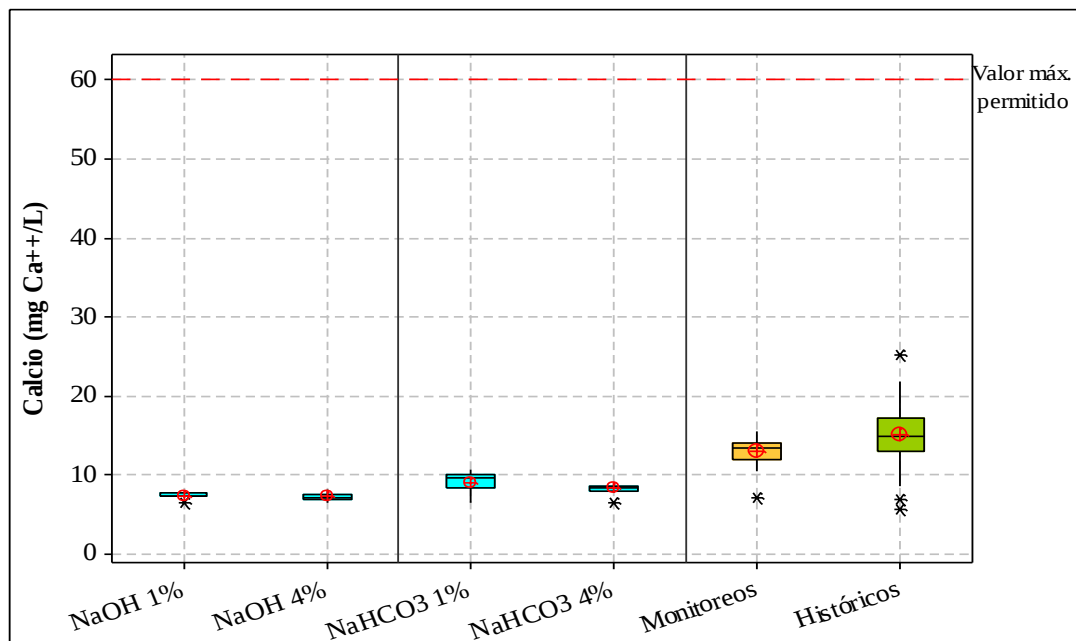
### Calcio

En consecuencia con lo anterior, los valores de calcio obtenidos después de los ensayos de dosificación fueron también bajos, lo que de nuevo se debe a que estos dos alcalinizantes no hacen ningún aporte de iones de  $\text{Ca}^{++}$  al agua (Manharawy y Hafez, 2002; Kim et al., 2008; Birnhack et al., 2011), por ende, la mayor parte del contenido de Calcio medido aquí corresponde al Calcio que ya tenía el agua clorada con la cual se llevaron a cabo los ensayos de dosificación, es decir un valor de 6.49 mg $\text{Ca}^{++}/\text{L}$ ; pese a lo anterior, el comportamiento que presentó este parámetro (Figura 6.18) exhibe en todos los casos valores del coeficiente de Spearman cercanos a +1, indicando que cuando incrementan las dosis de  $\text{NaOH}$  y el  $\text{NaHCO}_3$  el calcio –aunque poco– tiende a aumentar; este ligero incremento puede atribuirse al calcio presente en el agua tratada con la que se prepararon las soluciones alcalinizantes, contribuyendo tenuemente al incremento de la dureza total.



**Figura 6.18** Correlación entre la dosificación de  $\text{NaOH}$  y  $\text{NaHCO}_3$  y el Calcio

Con la comparación realizada entre concentraciones por medio de la prueba t-Student (Anexo 10.8 B) se establece que no hay diferencias significativas respecto al calcio aportado al agua por un mismo alcalinizante a distintas concentraciones, lo cual también se hace evidente al observar la Figura 6.18. De igual manera, cotejando las dosis comunes entre los alcalinizantes (10 y 20 mg/L) por medio del ANOVA, no se obtuvo una diferencia significativa entre uno u otro alcalinizante y su efecto en el contenido de calcio en el agua. Los valores de calcio alcanzados al igual que con lo evaluado en los datos históricos y de monitoreo, cumplen todos con la normatividad colombiana estando estos por debajo de  $60 \text{ mgCa}^{++}/\text{L}$  (Figura 6.18 y Figura 6.19).

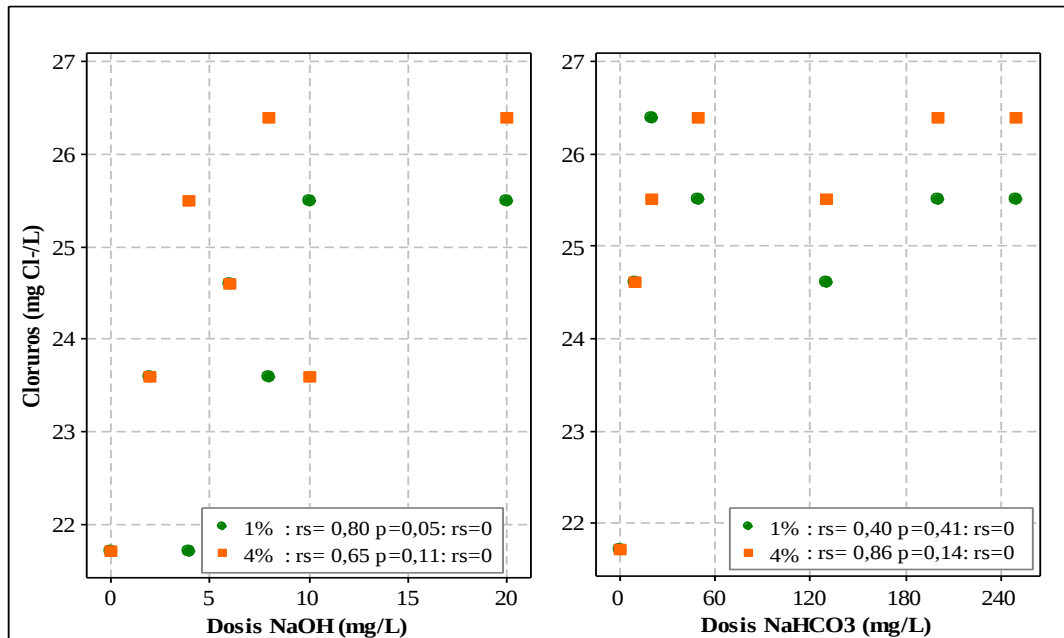


**Figura 6.19** Comparación del calcio: Ensayos de dosificación - monitoreos-e históricos

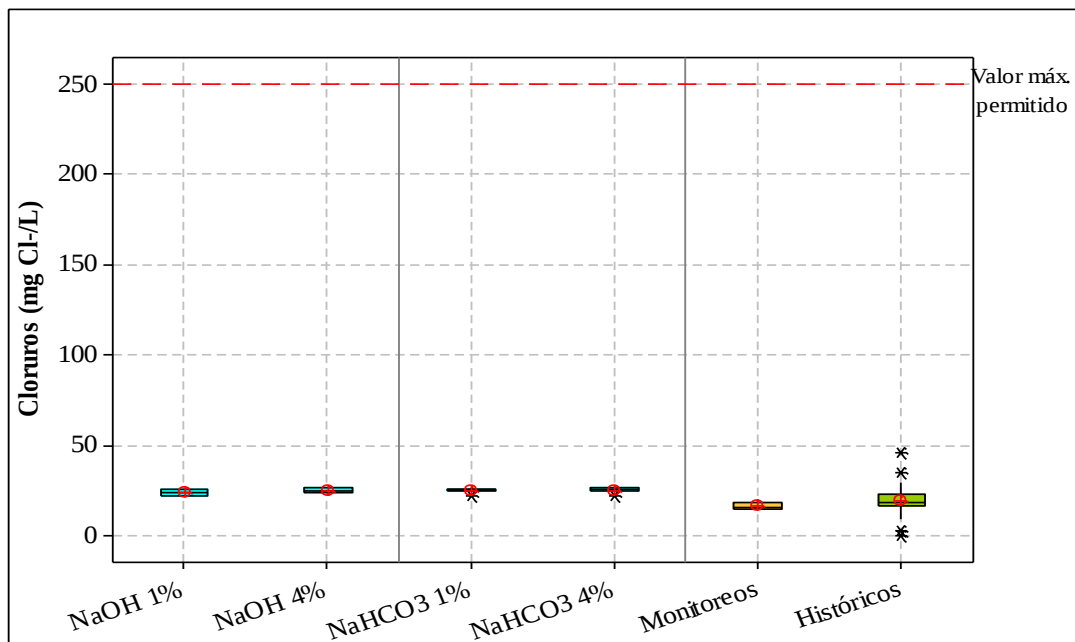
Es importante retomar en este punto que el contenido de calcio como la alcalinidad del agua son dos de las principales variables que influyen en la formación de la película protectora en el SDA, siendo recomendable que estos tengan un valor de al menos  $40 \text{ mg/L}$  como  $\text{CaCO}_3$  o  $16 \text{ mgCa}^{++}/\text{L}$  (Merrill y Sanks, 1977; Esvelt, 2010; WHO, 2011), para dar al agua estabilidad adicional con respecto a la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  (Esvelt, 2010); respecto a lo anterior, el calcio obtenido en los ensayos al igual que lo evaluado en los monitoreos, fue un parámetro que tampoco alcanzó este valor mínimo recomendado (Figura 6.19), obteniéndose de hecho valores menores, en los cuales el 75% de los datos no superó los  $10,10 \text{ mgCa}^{++}/\text{L}$  y el máximo obtenido fue de  $10,66 \text{ mgCa}^{++}/\text{L}$ , comparado con el máximo medido en los monitoreos de  $15,55 \text{ mgCa}^{++}/\text{L}$ ; mientras que un 25% de los históricos se encuentra dentro de los  $17,11\text{-}25,16 \text{ mgCa}^{++}/\text{L}$  que -como se mencionó con la dureza total- se debe a la adición de  $\text{Ca(OH)}_2$  que usualmente se hace en la PTAP, aportando  $\text{Ca}^{++}$  al agua. Finalmente, si los valores de calcio son bajos, la formación del precipitado de carbonato de calcio será muy difícil que ocurra (Esvelt, 2010).

## Cloruros

El comportamiento de los cloruros en los ensayos de dosificación se presenta en las Figura 6.20 y Figura 6.21.



**Figura 6.20** Correlación entre la dosificación de NaOH y NaHCO<sub>3</sub> y Cloruros



**Figura 6.21** Comparación de los cloruros: Ensayos de dosificación - monitoreos-e históricos

Respecto a los cloruros, teniendo en cuenta que la concentración inicial de estos fue 21.7mgCl<sup>-</sup>/L se puede concluir que la adición de NaOH y NaHCO<sub>3</sub> no modifica sustancialmente el contenido de estos en el agua. Los valores obtenidos para el coeficiente de Spearman (Figura 6.20) a diferencia de los obtenidos para el resto de parámetros hasta aquí son más bajos, denotando una menor correlación entre la dosificación de los alcalinizantes y los cloruros, adicional a esto el valor de significancia de la prueba fue en todos los casos >0,05, lo cual lleva a afirmar que no hay correlación entre las variables ( $r_s = 0$ ). Corroborando lo anterior, no se evidencia una tendencia determinada de esta variable en el agua. La máxima variación de este parámetro (llegando a 26.4 mgCl<sup>-</sup>/l) se presentó en varios casos tanto con el NaOH y el NaHCO<sub>3</sub>. Por lo anterior, no se realizaron más pruebas estadísticas para contrastar diferencias entre ensayos.

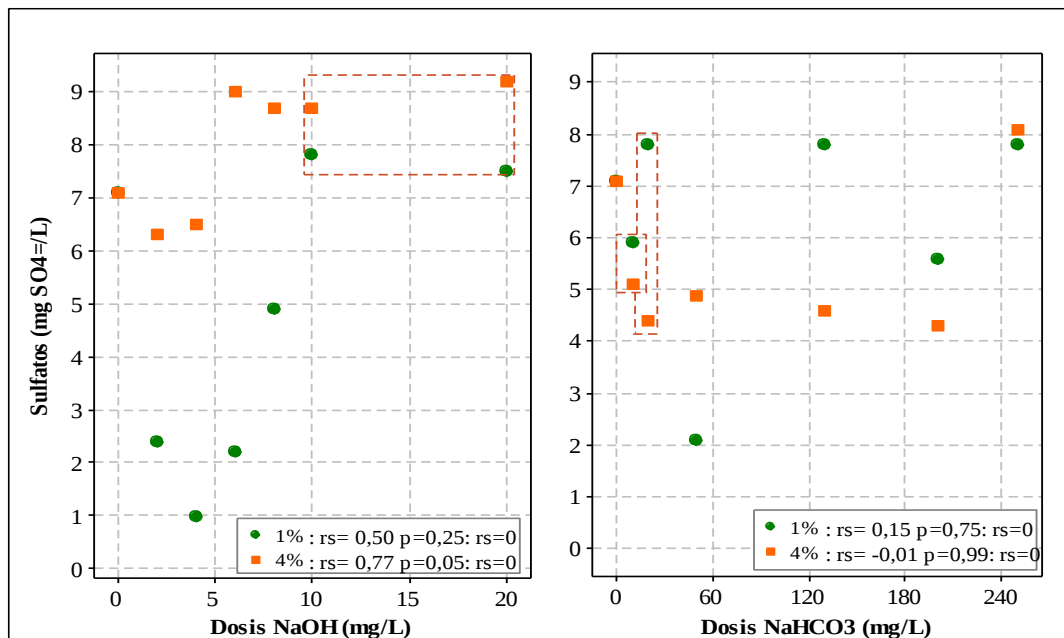
Los resultados obtenidos para esta variable tienen que ver con el hecho de que los cloruros medidos en los ensayos son un gran aporte del cloruro férrico adicionado en el proceso de coagulación y del cloro adicionado en el proceso de desinfección de la PTAP, pero la adición de los alcalinizantes no genera cambios significativos en los valores de este parámetro. De acuerdo con lo anterior, puede observarse en la Figura 6.21 que los cloruros medidos en los ensayos fueron superiores a aquellos medidos en los monitoreos y a los históricos, se infiere que esta diferencia está relacionada con la cantidad de cloruro férrico y cloro adicionado en las etapas anteriores, ya que el contenido de cloruros inicial (21,70 mgCl<sup>-</sup>/L) medido en los ensayos fue de por sí más elevado que los datos de monitoreo.

Como puede observarse, el 100% de los valores de cloruros -igual que los valores históricos y de monitoreo- se encuentran por debajo del valor máximo establecido en la normatividad colombiana (250 mg/L) (MPS/MAVDT, 2007) y están también por debajo de los 50 mg/L para así considerar que el agua obtenida no es agresiva respecto a los cloruros MILACRON (2004).

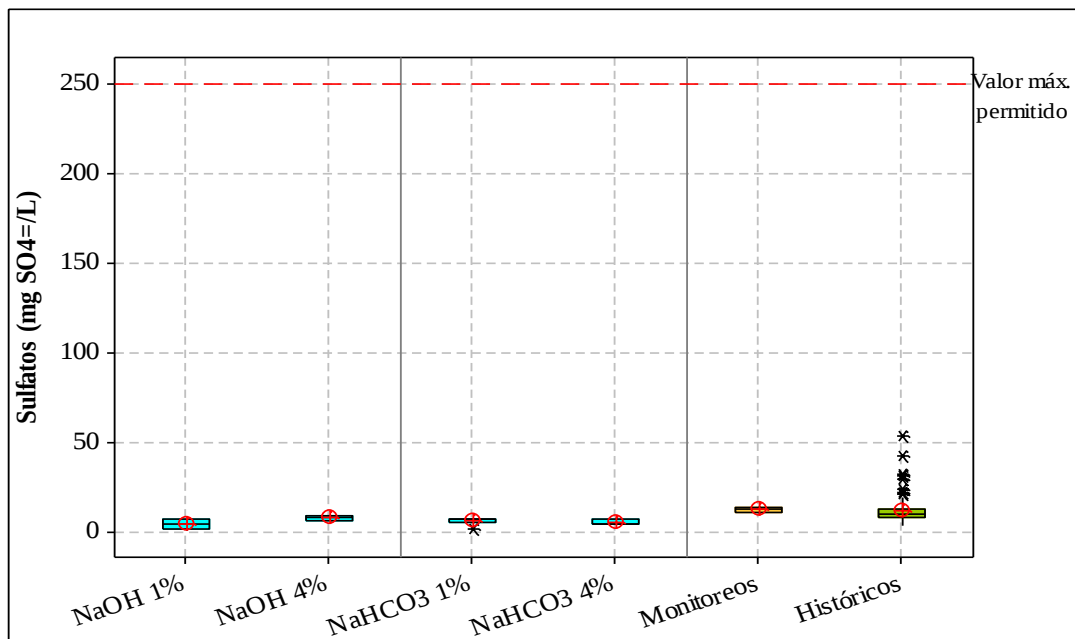
### *Sulfatos*

De acuerdo con Schock (2002), al igual que los cloruros, altos niveles de sulfatos en el agua pueden ser uno de los factores causantes del incremento de la corrosión en el SDA. El comportamiento que presentó esta variable después de los ensayos de dosificación se presenta a continuación en la Figura 6.22. Al observar los valores del coeficiente de Spearman obtenidos se evidencia que los sulfatos presentan un comportamiento similar a los cloruros ya que estos valores de  $r_s$  no son suficientemente elevados indicando que no hay una fuerte correlación entre ambas variables; de hecho con las dosis de NaHCO<sub>3</sub> se obtuvieron valores de  $r_s$  muy cercanos a cero ( $r_s = 0,15$  y  $r_s = -0,01$  para las concentraciones de 1% y 4% respectivamente), además los valores de significancia son superiores a 0,05, sugiriendo así que no existe una correlación entre las variables.

La Figura 6.22 no parece mostrar una tendencia determinada del contenido de sulfatos respecto a la aplicación de los alcalinizantes, ni parece existir diferencia entre concentraciones de un mismo alcalinizante; Por lo anterior, para esta variable al igual que para los cloruros, no se hicieron más pruebas estadísticas para contrastar diferencias entre ensayos. La Figura 6.23 presenta la comparación entre los ensayos de dosificación.



**Figura 6.22** Correlación entre la dosificación de NaOH y NaHCO<sub>3</sub> y Sulfatos



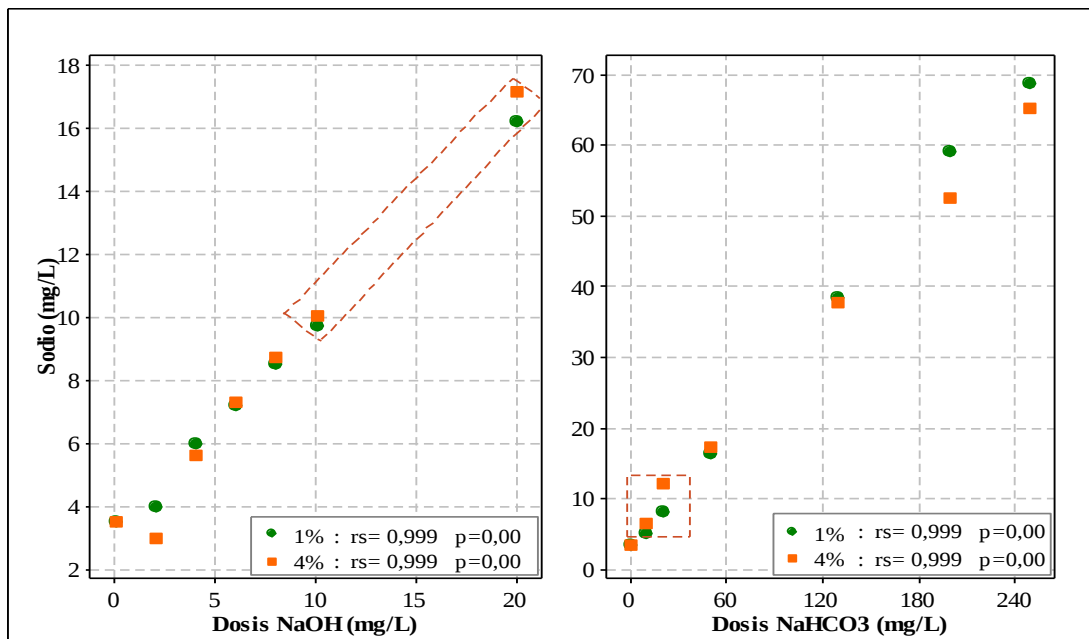
**Figura 6.23** Comparación de los sulfatos: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos

Como se aprecia en la figura anterior, en todos los casos, de igual manera que con lo medido en los monitoreos y los valores históricos, los sulfatos cumplieron con la resolución 2115 de 2007, de hecho siempre estuvieron muy por debajo del valor máximo establecido (250 mgSO<sub>4</sub><sup>-</sup>/L); de igual manera los datos estuvieron por debajo de los 50 mg/L para así considerar que el agua obtenida no es agresiva respecto a los sulfatos (Gray, 2008), no alcanzando en ningún caso los 10

$\text{mgSO}_4^{=}/\text{L}$ . Los datos históricos presentan un rango más amplio de valores, lo cual puede explicarse por el uso del sulfato de aluminio en el proceso de coagulación en los años analizados.

### Sodio

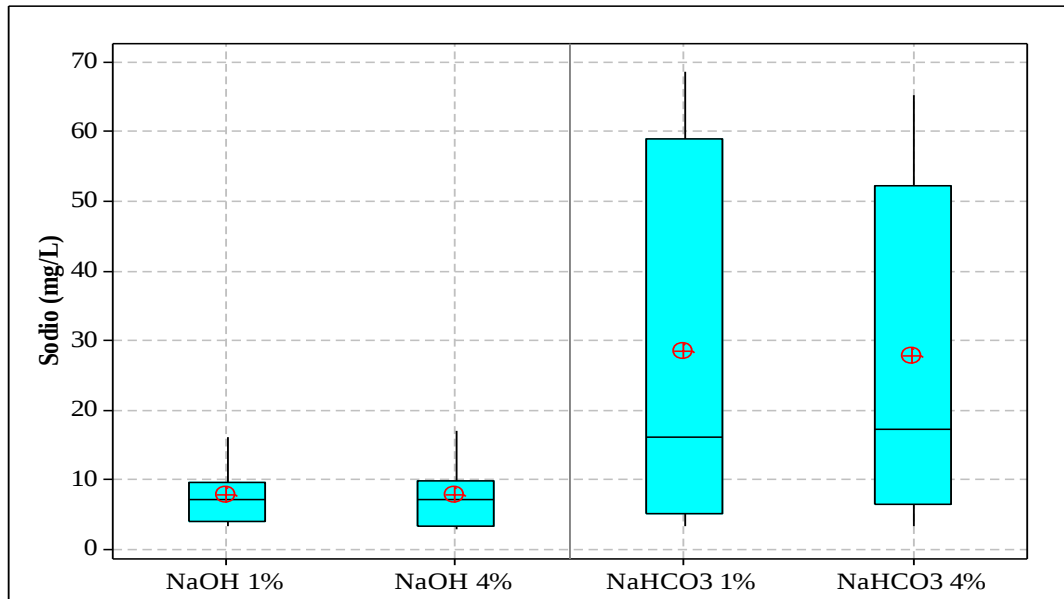
Según la Figura 6.24 que muestra la correlación entre la dosificación de los alcalinizantes y el contenido de sodio en el agua y de acuerdo con los coeficientes de Spearman obtenidos los cuales toman valores muy cercanos a +1, se determina que existe una fuerte y clara correlación entre ambas variables, lo cual indica que cuando se incrementan las dosis de  $\text{NaOH}$  y  $\text{NaHCO}_3$  el contenido de sodio en el agua por lo tanto aumenta. La Figura 6.25 presenta la comparación entre los 4 ensayos. Cabe mencionar que en este caso los valores obtenidos en los ensayos no se comparan con valores históricos, ya que este parámetro no es medido regularmente en la PTAP y no hay reportes de esta variable.



**Figura 6.24** Correlación entre la dosificación de  $\text{NaOH}$  y  $\text{NaHCO}_3$  y Sodio

Cotejando por medio de la prueba t-Student (Anexo 10.8 C) no se identificó una diferencia significativa respecto al aporte de sodio al comparar entre concentraciones de un mismo alcalinizante. Al observar la Figura 6.24 se hace evidente que los ensayos hechos con  $\text{NaHCO}_3$  ocasionaron mayores valores de sodio en el agua, esto debido a que cuatro de las dosis empleadas con este alcalinizante fueron mayores que las aplicadas con  $\text{NaOH}$ . Al realizar la comparación ANOVA entre las dosis de 10 y 20 mg/L (dosis comunes entre ambos alcalinizantes), -pese a que con la aplicación de  $\text{NaOH}$  se obtuvieron valores ligeramente superiores-, no se obtuvo con la prueba diferencia significativa entre los alcalinizantes; esto tiene sentido teniendo en cuenta que tanto el  $\text{NaOH}$  como el  $\text{NaHCO}_3$  aportan cationes de sodio ( $\text{Na}^+$ ) al agua en igual proporción (Birnhack et al., 2011); de acuerdo con lo anterior, esta variable presentó el comportamiento esperado, ya que no solo aumentó en el agua a mayor dosificación de cada alcalinizante, sino que

ambos incrementaron el valor de esta variable en proporciones similares.



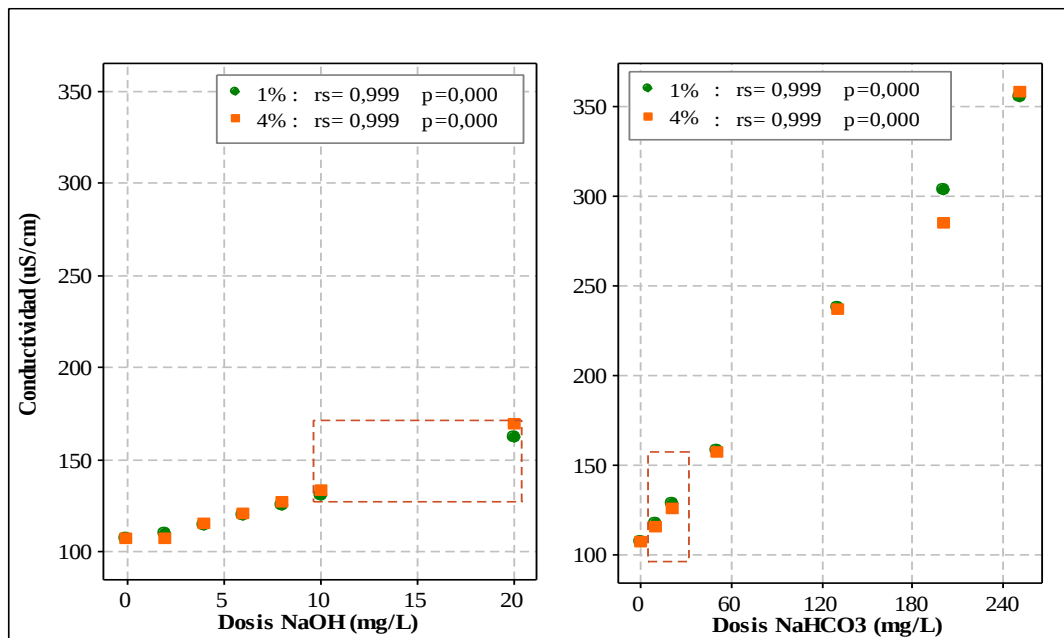
**Figura 6.25** Comparación del sodio: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos

Pese a las mayores concentraciones de sodio alcanzadas en los ensayos, las cuales fueron de 68.8 mg/L y 65.3 mg/L a concentraciones del 1% y 4% de  $\text{NaHCO}_3$  respectivamente, todos los valores estuvieron por debajo de los 200 mg/L que recomienda (WHO, 2011) tener como límite máximo, ya que a temperatura ambiente este es el umbral gustativo del sodio, el cual al detectarse puede generar rechazo por parte del consumidor. Para este parámetro no hay un valor máximo establecido en la resolución 2115 de 2007.

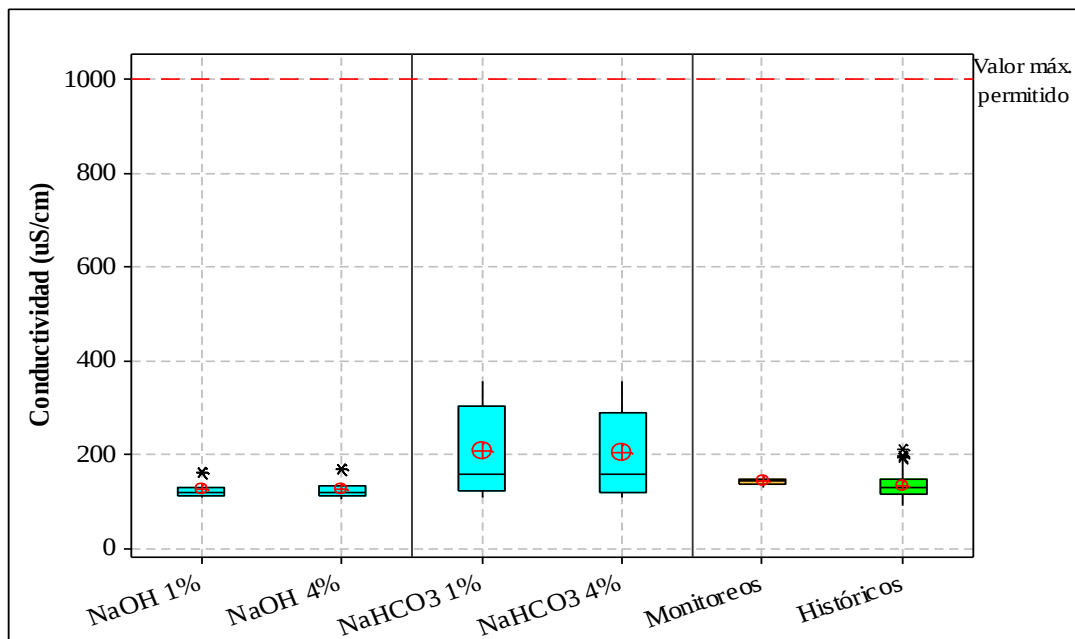
### *Conductividad*

Respecto a la conductividad, la Figura 6.26 y la Figura 6.27 presentan el comportamiento de esta variable en los ensayos de dosificación; se observa que se alcanzaron mayores valores de conductividad con el  $\text{NaHCO}_3$ , teniendo en cuenta de nuevo que con este alcalinizante se aplicaron cuatro dosis mayores que con el  $\text{NaOH}$ . Los valores del coeficiente de Spearman para este parámetro los cuales son muy cercanos a +1 con niveles de significancia de 0,000, indican una fuerte correlación entre la dosificación de los alcalinizantes y la conductividad del agua, es decir que a medida que se incrementan las dosis tanto de  $\text{NaOH}$  como de  $\text{NaHCO}_3$  la conductividad de igual manera tiende a aumentar; esto es de esperarse debido a que los alcalinizantes adicionan cationes de sodio al agua que a su vez ayudan a incrementar la conductividad del líquido (WHO, 2011).

Por medio de la prueba Mann-Whitney se determinó que el comportamiento de la conductividad no parece estar influenciado por la concentración –en este caso 1% o 4%– ya que no se encontró una diferencia significativa entre los valores de conductividad obtenidos al adicionar  $\text{NaOH}$  al 1% o 4%, igual ocurre con el  $\text{NaHCO}_3$ , lo cual se puede ratificar al observar las figuras.



**Figura 6.26** Correlación entre la dosificación de NaOH y NaHCO<sub>3</sub> y la conductividad



**Figura 6.27** Comparación de la conductividad: Ensayos de dosificación - monitoreos-e históricos

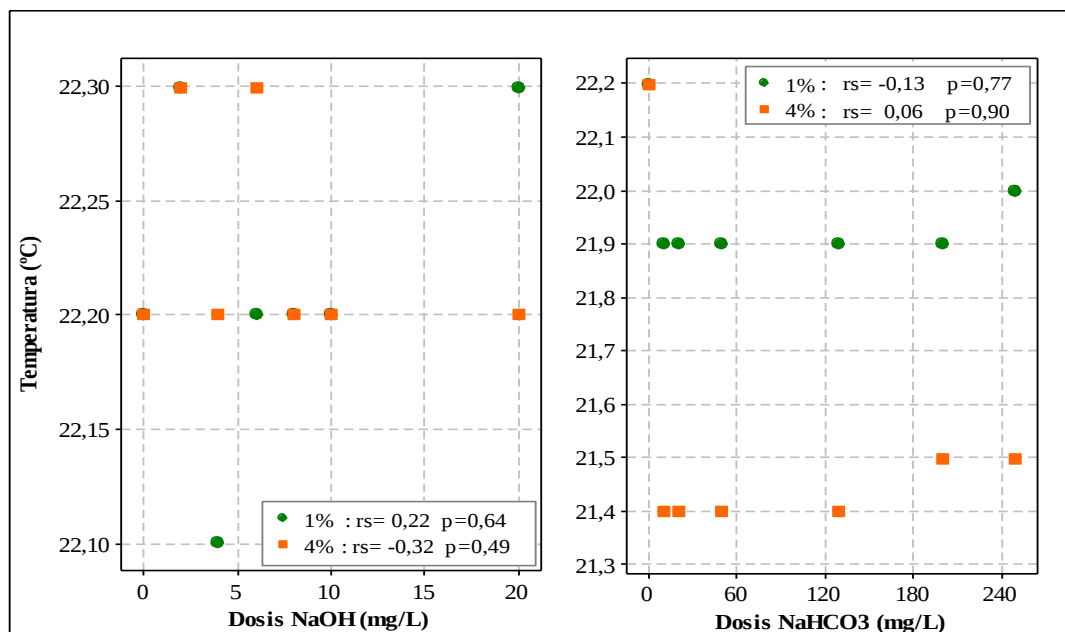
Comparando las dosis de 10 y 20 mg/L entre ambos alcalinizantes (Anexo 10.10 E), se encontró diferencia significativa ya que el NaOH generó conductividades promedio mayores en comparación con el NaHCO<sub>3</sub> (Figura 6.27), lo cual está ligado al hecho de que el NaOH en algunos casos ocasionó valores de sodio ligeramente superiores.

Es notorio que los valores medidos en los ensayos de dosificación para la conductividad, al igual que los históricos y de monitoreo analizados, se encuentran todos muy por debajo del máximo permitido en la resolución 2115 de 2007. También cabe mencionar que los datos de los ensayos realizados con el alcalinizante NaOH (de los cuales el 75% están por debajo de 130,80-133,15 uS/cm para concentraciones del 1% y 4% respectivamente) parecen ajustarse más a los históricos y a los medidos en monitoreos (donde el 75% están por debajo de 148,30-148,35 uS/cm respectivamente) en comparación con los obtenidos con el NaHCO<sub>3</sub>; estos últimos son comparables pero en las dosis más bajas ensayadas (10, 20 y 50 mg/L).

### Temperatura

El agua a altas temperaturas puede aumentar el crecimiento de microorganismos así como acrecentar problemas relacionados con el sabor, olor y corrosión en el SDA (WHO, 2011). La temperatura es un variable que también puede afectar significativamente la disolución de CaCO<sub>3</sub> (Schock, 2002). El comportamiento de esta variable en los ensayos de dosificación se presenta en la Figura 6.28 y Figura 6.29.

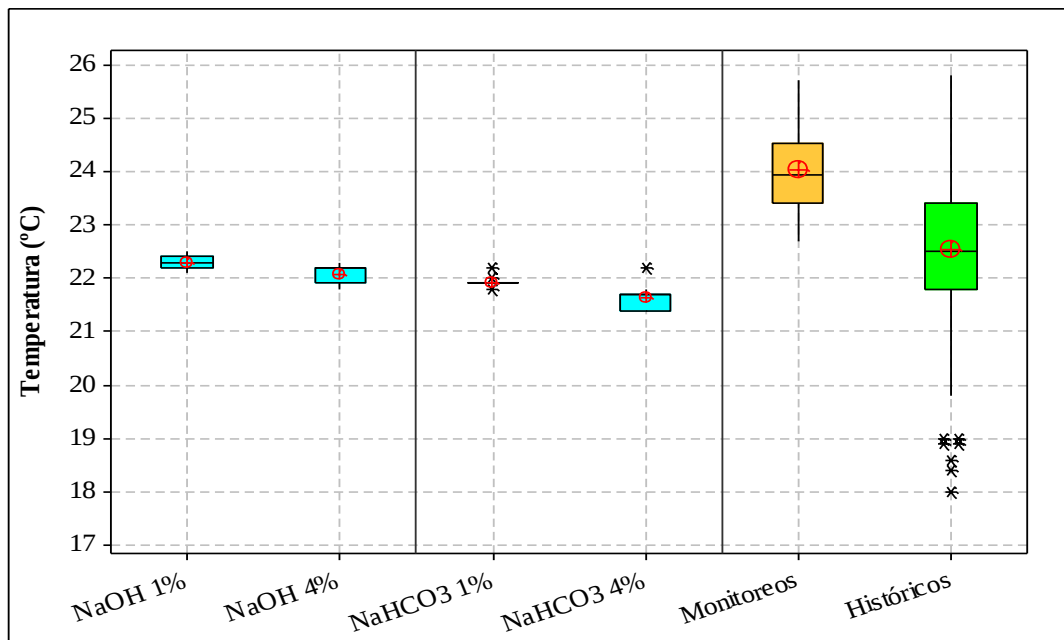
De acuerdo con los coeficientes de Spearman obtenidos los cuales fueron muy bajos (cerca de cero) con niveles de significancia  $> 0,05$  (0,49 – 0,89) en los cuatro ensayos, se determina que no existe correlación entre la dosificación de los alcalinizantes y la temperatura del agua, de manera tal que no se puede inferir que aplicar los alcalinizantes genera cambios en la temperatura del agua; por esta razón, para esta variable -como con los cloruros y sulfatos- no se hicieron más pruebas estadísticas para contrastar diferencias entre ensayos.



**Figura 6.28** Correlación entre la dosis de NaOH y NaHCO<sub>3</sub> y la temperatura

El valor de esta variable presentó poca variación en su distribución (Figura 6.29) oscilando entre los 21,40°C y 22,30°C, rango cercano a la temperatura ambiental del momento, la cual estuvo

alrededor de los 23°C (IDEAM, 2014). Es evidente también que hay una diferencia entre las temperaturas medidas en los ensayos, los cuales tuvieron medias entre  $21,62 \pm 0,23$  –  $22,29 \pm 0,13$  y aquellas temperaturas históricas y las medidas en el periodo de monitoreo, con medias de  $22,54 \pm 1,07$  y  $24,01 \pm 0,84$  respectivamente; esto es lógico debido a que los datos de ensayos y de monitoreos se midieron en épocas distintas del año, mientras que los datos históricos corresponden a años distintos. Para esta variable no hay un rango establecido en la norma colombiana.



**Figura 6.29** Comparación de la temperatura: Ensayos de dosificación- monitoreos-e históricos

Como conclusión respecto al cumplimiento de la normatividad colombiana con los resultados obtenidos en los ensayos de dosificación, puede resaltarse que para la dosificación con NaOH tanto a una concentración del 1% como del 4%, la turbiedad, alcalinidad total, dureza total, calcio, cloruros, sulfatos y conductividad fueron los parámetros que en cualquiera de las dosis ensayadas estuvieron por debajo de los valores establecidos en la norma Colombiana de agua potable, mientras que el pH estuvo por fuera de la normatividad al aplicar ciertas dosis del alcalinizante. En el caso de la dosificación de NaHCO<sub>3</sub> en ambas concentraciones, todos los parámetros cumplieron con la norma en cualquiera de las dosis aplicadas.

#### ❖ Índice de Saturación de Langelier (ISL)

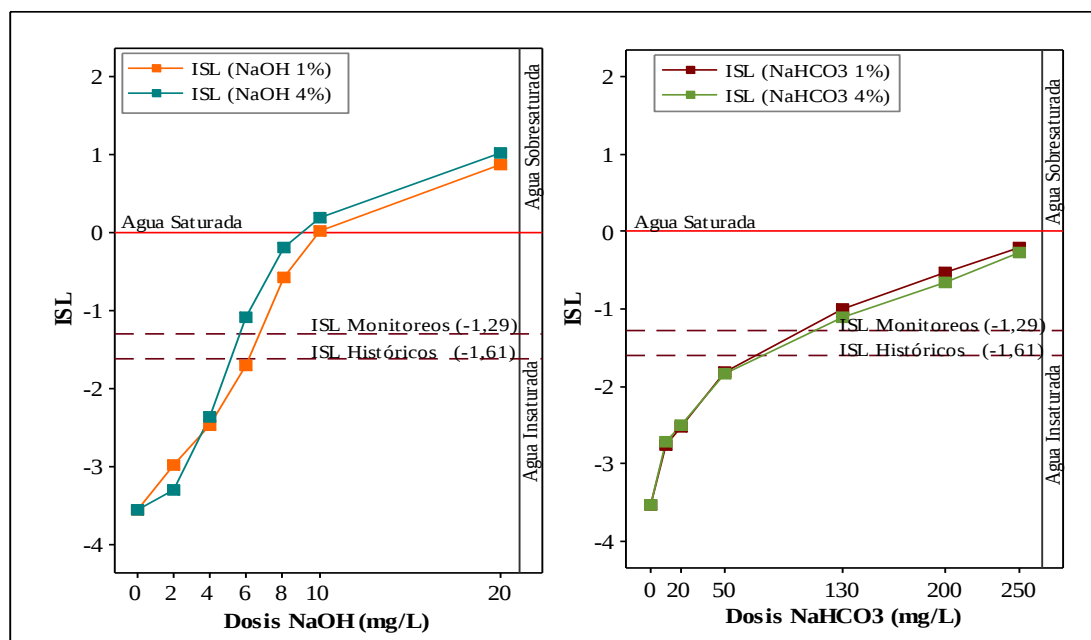
El índice de Saturación de Langelier, que es la diferencia entre el pH real de un agua y su pH de saturación, es el índice ampliamente aceptado para medir la tendencia del agua a precipitar CaCO<sub>3</sub> (Birnhack et al., 2011; Esvelt, 2010; Bueno et al. 2014 ); éste se basa en que para cualquier tipo de agua con una alcalinidad y una concentración de Calcio determinada existe un pH al cual el CaCO<sub>3</sub> alcanza el equilibrio entre la fase sólida (formación de la película protectora) y el estado disuelto de ésta (Esvelt, 2010); por lo tanto, las aguas con un ISL positivo son capaces de depositar la película de carbonato de CaCO<sub>3</sub> (WHO, 2011), permitiendo de esta manera un

control de la corrosión en el SDA. Aunque el ISL tiende a predecir si el  $\text{CaCO}_3$  precipitará o se disolverá, éste no indica que cantidad de la sal precipitará o si su estructura proporcionará resistencia a la corrosión; en función de su valor se deben agregar químicos para estabilizar el agua ajustando el pH (De Sousa et al., 2010).

Tomando como base los valores obtenidos para los distintos parámetros en los ensayos de dosificación y las ecuaciones expuestas en el ítem 5.3.5, se calculó el ISL para cada dosis aplicada de NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  a las distintas concentraciones. Los valores resultantes de este índice para las distintas dosis de cada alcalinizante se presentan en el Anexo 10.7, mientras que la Figura 6.30 representa dichos valores.

De acuerdo con los valores del ISL obtenidos, se establece que el agua está sobresaturada si  $\text{ISL} > 0$  y por lo tanto se espera que ocurra la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , está saturada si  $\text{ISL} = 0$  y está insaturada si  $\text{ISL} < 0$ , por lo tanto puede llevar a la disolución de la película de  $\text{CaCO}_3$  (Trujillo et al., 2008; De Sousa et al., 2010; Esvelt, 2010).

En consecuencia con lo anterior, se establece que para el agua dosificada con NaOH a una concentración tanto del 1% como del 4%, las dosis 2, 4, 6 y 8 mg/L generaron un agua insaturada, mientras que dosis de 10 y 20 mg/L dieron como resultado un agua sobresaturada. En el caso del  $\text{NaHCO}_3$  todos los ISL en las concentraciones de 1% como de 4% generaron un agua con condiciones de insaturación; al comparar los cuatro ensayos a dosis de 10 y 20 mg/L por medio del ANOVA (Anexo 10.12 A) se constató la evidente diferencia existente entre estos ya que los ISL promedio generados por la adición de NaOH fueron positivos y superiores en comparación con los obtenidos por la adición de  $\text{NaHCO}_3$ , siempre negativos.



**Figura 6.30** Índices de Saturación de Langelier para ensayos de dosificación con NaOH y  $\text{NaHCO}_3$

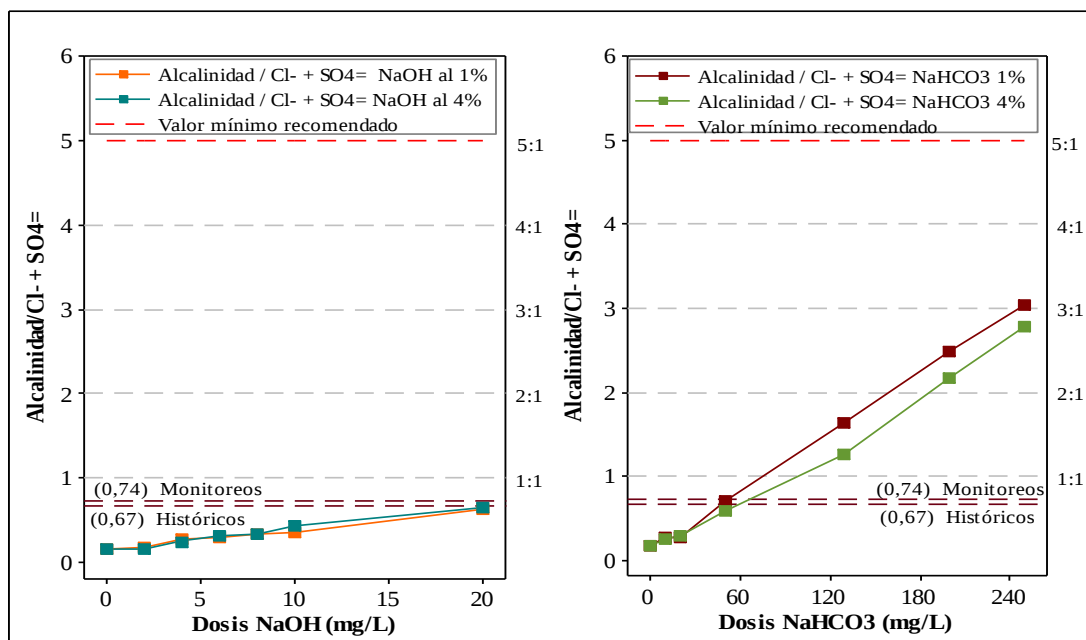
Pese a lo anterior, las dosis de (8, 10 y 20) mg/L y (6, 8, 10 y 20) de NaOH al 1% y 4% respectivamente, permitieron generar valores del ISL mayores en comparación con los evaluados para los datos históricos y de monitoreos. Lo mismo ocurrió con el  $\text{NaHCO}_3$  en las dosis más altas (130, 200 y 250) mg/L.

Teniendo en cuenta que con el fin de generar la película protectora en el SDA se espera obtener un ISL cercano a cero ligeramente positivo (Esvelt, 2010), las únicas dosis que favorecen esta condición de acuerdo con lo ensayado son las dosis de 10mg/L y 20mg/L de NaOH a concentraciones tanto del 1% como del 4%; sin embargo, los valores de pH –que en estos casos estuvieron por encima del pHs- exceden la normatividad Colombiana (Resolución 2115 de 2007). De igual manera, de acuerdo con el estudio llevado a cabo por Bueno et al. (2014) sería necesario incrementar los valores de alcalinidad del agua tratada del río Cauca a valores cercanos a la alcalinidad de equilibrio (alrededor de 36,7  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ) para de esta manera promover la precipitación de la película de  $\text{CaCO}_3$ , lo que en el caso del NaOH inevitablemente de nuevo implicaría el aumento del pH en valores que sobrepasarían la norma Colombiana; de esta manera el pH límite establecido en la normativa Colombiana se convierte de alguna manera en un limitante para llevar a cabo un control satisfactorio de la corrosión por medio de la formación de la película de  $\text{CaCO}_3$ .

#### ❖ Relación alcalinidad / $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{=}$

Como ya se ha mencionado, las concentraciones de cloruros y sulfatos también influyen en la capacidad corrosiva del agua; estos pueden reaccionar con los metales en solución causando que permanezcan solubles y pueden también interferir con la formación normal de películas de óxidos, hidróxidos o hidroxicarbonatos (Schock, 2002). Excesivas concentraciones de estas variables incrementan la tasa de corrosión en el SDA dependiendo de la alcalinidad presente en el líquido, razón por la que se recomienda que la relación alcalinidad /  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{=}$  (expresados como  $\text{CaCO}_3$ ) sea al menos de 5:1 (WHO, 2011). Con base en lo anterior, se calculó la relación alcalinidad/  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{=}$  para cada una de las dosis de los distintos alcalinizantes en cada una de sus concentraciones; estos valores se representaron en la Figura 6.31.

Como puede observarse en la figura, ninguna de las relaciones obtenidas llega a la relación 5:1 que se recomienda sea la relación mínima mantenida. A través del ANOVA realizado para comparar los cuatro ensayos a dosis de 10 y 20 mg/L no se encontraron diferencias significativas entre ninguno de estos; pese a lo anterior, teniendo en cuenta las dosis restantes, es evidente que de ambos alcalinizantes el  $\text{NaHCO}_3$  en sus dos concentraciones y especialmente al 1% y con una dosis de 250mg/L fue el que más se aproximó al valor recomendado de esta relación llegando a una proporción 3:1. Con el NaOH no se superó la relación alcalinidad /  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{=}$  promedio para los datos de monitoreo e históricos, mientras que el  $\text{NaHCO}_3$  si permitió superar estos valores a partir de las dosis de 130 mg/L.



**Figura 6.31** Relaciones alcalinidad/Cl- + SO4= para ensayos de dosificación con NaOH y NaHCO<sub>3</sub>

En consecuencia con el análisis hecho de todos los resultados obtenidos previamente, puede concluirse que ni el NaOH ni el NaHCO<sub>3</sub> a las dosis ensayadas permitieron generar un agua tratada que satisfaga simultáneamente las cuatro condiciones evaluadas, es decir:

- Cumplir con la normatividad colombiana en cuanto a las variables evaluadas
- Presentar un ISL > 0
- Presentar valores de Ca<sup>++</sup> y alcalinidad por encima de 40 mg/L como CaCO<sub>3</sub>
- Cumplir con la relación alcalinidad/Cl<sup>-</sup> + SO<sub>4</sub><sup>=</sup> como mínimo de 5:1.

Como consideraciones generales a raíz de lo evaluado en los ensayos de dosificación, puede plantearse respecto a las concentraciones evaluadas con los alcalinizantes (1% y 4%) que éstas en términos generales no presentaron diferencias significativas entre una y otra para la mayoría de las variables evaluadas; las variables en las que se reflejó alguna diferencia entre concentraciones fueron la turbiedad para el NaOH y la dureza total para el NaHCO<sub>3</sub>. Aunque puede ser recomendable el uso de los alcalinizantes con la mayor de estas concentraciones (4%) ya que esto disminuiría el requerimiento de agua tratada para preparar las soluciones, se debe considerar siempre tener precaución en la dosificación del NaOH, siendo recomendable para este alcalinizante el uso de la concentración al 1% en dosis hasta 8 mg/L, para no correr riesgo de sobredosis con este alcalinizante y para no generar turbiedades altas.

En cuanto a las dosis empleadas, se observó que las dosis más elevadas fueron las que permitieron acercar los parámetros del agua ensayada a los valores recomendados para el control de la corrosión por medio de la precipitación de la película de CaCO<sub>3</sub>. Valores adecuados del ISL (>0) solo se alcanzaron con el NaOH con las mayores dosis de 10 y 20 mg/L en cualquiera de las dos concentraciones; pese a esto y aunque con estas dosis se logró incrementar la alcalinidad del

agua, los valores fueron bajos respecto a lo mínimo recomendado ( $40 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ), al igual que la relación ( $\text{alcalinidad}/\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ ) que frente a la proporción 5:1 recomendada no llegaron siquiera a la relación 1:1, lo cual se dio principalmente por la baja alcalinidad, ya que los valores tanto de cloruros como de sulfatos no exceden y de hecho están lejos de los  $50 \text{ mg/L}$  que se sugieren para minimizar la corrosión en el SDA (Gray, 2008). El  $\text{NaHCO}_3$  aunque permitió generar valores altos de alcalinidad (hasta de  $134,20 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ), las dosis utilizadas fueron mucho mayores ( $130, 200$  y  $250 \text{ mg/L}$ ) que las empleadas con el  $\text{NaOH}$ , además los valores de calcio permanecieron bajos y no fue posible alcanzar un valor de pH que esté dentro del rango de pH de saturación  $8,7 - 9,0$  unidades que ayude a promover la formación de la película protectora de  $\text{CaCO}_3$ , lo cual se ve reflejado en los valores del ISL que fueron siempre menores a 0 con este alcalinizante. Comparando las dosis comunes aplicadas para ambos alcalinizantes ( $10$  y  $20 \text{ mg/L}$ ), es evidente que el  $\text{NaOH}$  es el que requiere menos producto para generar igual o mejores condiciones en el proceso de ajuste de pH en comparación con el  $\text{NaHCO}_3$ .

Al contrastar algunos de los resultados que se obtuvieron con estudios relacionados, se identifican coincidencias como es el caso del estudio hecho por Maddison et al. (2001) en el cual se encontró que si bien el uso de  $\text{NaOH}$  es efectivo como estrategia para incrementar el valor del pH del agua, fue un producto que generó también un aumento en la turbiedad del líquido llegando a un máximo de  $1,2 \text{ UNT}$ , valor similar al máximo obtenido con el  $\text{NaOH}$  en estos ensayos de dosificación ( $1,06 \text{ UNT}$ ); Booth (2011) por su parte estableció que con una dosis de  $8 \text{ mg/L}$  de  $\text{NaOH}$  se alcanzaba un pH del agua de  $7,6$  unidades, valor más bajo en comparación con los obtenidos en los ensayos de dosificación de este estudio donde para esta misma dosis se llegaron a valores de  $8,77$  unidades y  $9,09$  unidades con  $\text{NaOH}$  al  $1\%$  y  $4\%$  respectivamente; este mismo autor, logró también resultados satisfactorios para el ISL y la relación  $\text{alcalinidad}/\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$  sin implicar un incremento excesivo del pH, lo cual no fue posible en este estudio; estos resultados están muy ligados a las características que presenta la fuente de abastecimiento; en el caso de las características del agua evaluada por Booth (2011), la fuente presentaba valores de alcalinidad y dureza total que oscilaban los  $100 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ .

por su parte, Esvelt (2010) determinó que con dosis de  $9 \text{ mg/L}$  y  $7 \text{ mg/L}$  de  $\text{NaOH}$  para dos fuentes de agua distintas, aumentaría el pH del líquido hasta un valor de  $8,3$  unidades; estos datos presentan cierta similitud con los obtenidos en este estudio donde con dosis de  $8 \text{ mg/L}$  de  $\text{NaOH}$  al  $1\%$  se logró un pH de  $8,77$  unidades y con una dosis de  $6 \text{ mg/L}$  de  $\text{NaOH}$  al  $4\%$  se alcanzó un pH de  $8,23$  unidades; Sin embargo el estudio hecho por Esvelt no coincide con los resultados obtenidos en este estudio respecto al ISL, ya que en dicha evaluación con las dosis mencionadas fue posible alcanzar valores para este índice de  $+0,1$ , lo cual no se consiguió en estos ensayos llevados a cabo sino a partir de las mayores dosis ( $10$  y  $20 \text{ mg/L}$ ). Lo anterior de nuevo encuentra explicación en las características del agua evaluada por Esvelt, donde ambas fuentes presentan valores de alcalinidad y dureza superiores a los  $120 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ .

Respecto al  $\text{NaHCO}_3$ , los máximos valores de pH y alcalinidad obtenidos con este alcalinizante por Tang et al. (2006) estuvieron alrededor de las  $8,4$  unidades y  $240 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$  respectivamente; el valor del pH fue cercano al máximo obtenido en este estudio con el mismo producto ( $8,06$  unidades), en cuanto a la alcalinidad el valor sobrepasa al máximo obtenido en este estudio con la máxima dosis de  $250 \text{ mg/L}$  ( $134,2 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ); Liang et al. (2013) obtuvo

un pH de 8,0 unidades y una alcalinidad de 100mgCaCO<sub>3</sub> al usar este producto. Lo anterior corrobora que el NaHCO<sub>3</sub> es un alcalinizante muy efectivo para incrementar la alcalinidad, pero no incrementa el pH a valores superiores a 8,5 unidades.

Teniendo en cuenta además, que la corrosión es un fenómeno relacionado no solo con las características fisicoquímicas del agua sino también con el material con el cual el agua entra en contacto (Trujillo et al., 2008), cabe mencionarse entonces que el control de la corrosión en el SDA de la ciudad de Cali es por lo tanto fundamental, considerando que el 11,65% y el 1,11% del SDA corresponden a tuberías de hierro y acero respectivamente, las cuales al estar en contacto con agua que posea baja alcalinidad y dureza pueden liberar hierro al agua, el cual incrementa la turbiedad y color de esta que pueden generar así molestias para los usuarios. Las tuberías de AC, que corresponden al 30,74% del SDA, contienen una variedad de metales y calcio que en contacto con aguas corrosivas puede generar su lixiviación, llevando además a la ocurrencia de fallas estructurales, lo cual se ha evidenciado en el SDA de Cali (PDA, 2008), por lo que es importante mantener un pH > 8,5 unidades con este tipo de tubería (WHO, 2011). Respecto al PVC, este material corresponde actualmente al 52,80% del SDA y adicionalmente EMCALI ha proyectado dentro de sus planes de inversión la reposición de tuberías de los materiales mencionados inicialmente (Hierro y AC), las cuales son las tuberías de mayor edad instaladas en la ciudad, por tuberías tipo PVC (EMCALI, 2013); Este tipo de material es más recomendable para limitar la corrosión en el SDA que los tubos de hierro o cemento, ya que es un material no conductor y no se deteriora tan fácilmente como ocurre con las tuberías de hierro (Niquette et al., 2000).

Pese a lo anterior, autores como Cerrato (2005), Lasheen et al. (2008) y Vasile et al., 2012, han demostrado que este tipo de tuberías al estar compuestas generalmente por estabilizantes que suelen ser sales de metales pueden, a ciertas condiciones de pH y alcalinidad, liberar hierro al agua con la que están en contacto; lo anterior fue corroborado por Muñoz et al. (2007) encontrando acumulaciones de hierro, además de biopelículas en las tuberías de PVC de la red baja del SDA de Cali. Los autores Cerrato (2005), Lasheen et al. (2008) y Vasile et al. (2012) también demostraron que a mayores valores de pH (> 8,0 unidades) y alcalinidad, la liberación de hierro se reduce, por lo que aún con este material de tubería sigue siendo muy importante mantener valores adecuados de estas variables en el agua que ingresa al SDA. Jaeger et al. (2004) sostiene que el ajuste de pH y de alcalinidad es confiable para cualquier tipo de material, es decir que permite proteger de la liberación de metales a todo tipo de tuberías.

Ante esto, se evidencia entonces que es recomendable evaluar la mezcla de alcalinizantes o el uso de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que proporcionen los valores recomendados por la literatura y establecidos por la normatividad en cuanto a los parámetros de pH, alcalinidad y dureza del agua. Para lo anterior es importante tener en cuenta que con el fin de disminuir el pH e incrementar la alcalinidad del agua, el CO<sub>2</sub> es uno de los ácidos típicamente empleados (Birnhack et al., 2011). Adicional a esto, los resultados permiten inferir que no hay riesgo de que se generen incrustaciones de calcio en el SDA ya que la alcalinidad y la dureza obtenidas fueron mucho menores a 200mg/L, valor a partir del cual se considera que un agua puede generar incrustaciones (Gray, 2008; WHO, 2011); además el ISL indicó que el NaHCO<sub>3</sub> en las condiciones ensayadas no precipitará CaCO<sub>3</sub> al SDA ya que nunca alcanzó el pHs, mientras que el NaOH solo podría

generar esta precipitación en las dosis de 10 y 20 mg/L; dosis que no se podrían implementar a escala real pues estas exceden la normativa colombiana en términos de pH.

Adicionalmente cabe mencionar con relación a aspectos técnicos y operativos de los alcalinizantes lo siguiente: En cuanto a la adquisición de estos, ambos alcalinizantes se encuentran fácilmente en el país, en presentación de escamas, polvo o en solución en el caso del NaOH, o en polvo como suele encontrarse el  $\text{NaHCO}_3$ , ambos con un alto contenido activo. En cuanto a las condiciones de almacenamiento estas no son extremas para ninguno de los alcalinizantes, en ambientes adecuados no se deterioran rápidamente. La dosificación de ambos productos en forma de solución requeriría la disolución previa del  $\text{NaHCO}_3$ , mientras que el NaOH ofrece la ventaja de poder ser encontrado directamente en forma de solución, pero con este último producto al ser una base fuerte, la PTAP debe contar con equipos de monitoreo y control de manera que no se produzca una sobredosificación y por lo tanto un incremento drástico del pH (Torres et al., 2008; AMEC, 2011).

Por lo anterior, el tipo de planta en la que suele emplearse el NaOH es en PTAPs a gran escala, como la PTAP Puerto Mallarino, mientras que el  $\text{NaHCO}_3$  tiende a ser recomendado para PTAPs de pequeña escala; este último presenta mejor solubilidad a temperatura por encima de los  $28^\circ\text{C}$  (CQ, 2006), mientras que el NaOH presenta alta solubilidad facilitando así su mezcla con el agua. En cuanto al riesgo de manejo también hay diferencia entre los productos, ya que el NaOH por ser corrosivo es clasificado como un peligro serio a la salud ocupacional por lo que requiere de algunas medidas especiales para su manejo, mientras que el  $\text{NaHCO}_3$  representa un riesgo mínimo de acuerdo con el NFPA 704. Finalmente el NaOH tiende a ser costoso como materia prima en comparación con el  $\text{NaHCO}_3$  y presenta costos adicionales asociados con el uso de elementos de protección personal; sin embargo las cantidades requeridas –que tienden a ser mucho menores en comparación con el  $\text{NaHCO}_3$ – y los costos adicionales de operación y mantenimiento deben considerarse para definir la viabilidad de implementar uno u otro producto.

## 7 CONCLUSIONES

Debido a que las tuberías de un SDA se instalan con el fin de que prevalezcan durante un largo periodo de tiempo, la protección de este sistema es esencial para proporcionar un suministro de agua segura a los consumidores y para mantener la integridad del sistema. Para evitar riesgos por mala calidad del agua en la red se deben prevenir entre otros, problemas relacionados con la corrosión y formación de depósitos y biopelículas; por lo que además de un programa periódico de limpieza de la red, el ajuste del pH del agua tratada antes de que esta ingrese al SDA es una etapa crítica a llevar a cabo en las PTAP.

De acuerdo con la revisión bibliográfica hecha, se identificaron la Cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), el Carbonato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), el Bicarbonato de Sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ), Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y el Hidróxido de Sodio ( $\text{NaOH}$ ) como los alcalinizantes más empleados para llevar a cabo el proceso de ajuste de pH del agua potable antes de que esta ingrese al SDA. La escogencia de uno u otro de estos productos está ligada no solo al efecto que éstos generen en el agua sino también a factores operativos como dosificación, mantenimiento, manejo, facilidad de adquisición, factores de salud ocupacional, así como factores económicos.

De acuerdo con los datos de información histórica y de monitoreos realizados para el agua tratada en la PTAP Puerto Mallarino, se determinó que las variables turbiedad, pH, alcalinidad total, dureza total, calcio, cloruros, sulfatos y conductividad presentan valores dentro de los máximos y mínimos aceptables en la normatividad colombiana (resolución 2115 de 2007); sin embargo, la alcalinidad total y el contenido de calcio son dos variables que no alcanzan el valor mínimo sugerido en la literatura ( $40 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ), así como el pH que no alcanza el pHs, para que el agua que deja la PTAP después del proceso de ajuste de pH facilite la formación de la película protectora en el SDA y disminuya el riesgo de corrosión en este.

Los ensayos de dosificación llevados a cabo con  $\text{NaOH}$  y  $\text{NaHCO}_3$  a concentraciones de 1% y 4% y dosis de 2, 4, 6, 8, 10 y 20 mg/L para el  $\text{NaOH}$  y de 10, 20, 50, 130, 200 y 250 mg/L para el  $\text{NaHCO}_3$  generaron valores de turbiedad, alcalinidad total, dureza total, calcio, cloruros, sulfatos y conductividad que cumplieron siempre con la normatividad colombiana; el pH por su parte fue una variable que con las dosis de 10 y 20 mg/L de  $\text{NaOH}$  al 1% y dosis de 8, 10 y 20 mg/L de  $\text{NaOH}$  al 4% excedió el límite máximo de 9,0 unidades permitido en la resolución 2115 de 2007. El sodio, que si bien no es un parámetro regulado en la normatividad colombiana, se mantuvo siempre muy lejos del valor del umbral gustativo ( $200 \text{ mg/L}$ ). De acuerdo con lo anterior, las dosis ensayadas con ambos alcalinizantes (excepto las mayores dosis de  $\text{NaOH}$  1%: 10 y 20 y  $\text{NaOH}$  4% 8-20 mg/L) se podrían aplicar al agua clorada del río Cauca en el proceso de ajuste de pH garantizando el cumplimiento de la normatividad colombiana.

Con el  $\text{NaOH}$  al 1% y 4% en dosis de 10 y 20 mg/L se obtuvieron valores del  $\text{ISL} > 0$  (agua sobresaturada) con tendencia a precipitar la película de carbonato de calcio en el SDA; sin embargo, al igual que con los datos históricos y de monitoreo y pese a las mayores dosis aplicadas de  $\text{NaOH}$  en los ensayos de dosificación, no fue posible alcanzar valores de alcalinidad y dureza cálcica recomendados para la formación de la película protectora en el SDA ( $> 40 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ); la máxima alcalinidad lograda con este producto fue de  $31 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$  con la

dosís de 20 mg/L y una concentración del 4% y una dureza cálcica de 20,2 mgCaCO<sub>3</sub>/L con la misma dosís y concentración. De igual manera la relación Alcalinidad/Cl<sup>-</sup> + SO<sub>4</sub><sup>=</sup> no cumplió con el mínimo recomendado de 5:1, ya que con este alcalinizante no se llegó siquiera a la relación 1:1. De esta manera se concluye que la dosificación con NaOH no cumplió con todas las condiciones evaluadas, aunque permitió generar valores más altos de alcalinidad, pH e ISL respecto a lo evaluados histórica y actualmente para la PTAP Puerto Mallarino, pero no ocurre igual con la dureza cálcica.

Con el NaHCO<sub>3</sub> a dosís de 130, 200 y 250 mg/L sí se obtuvieron valores de alcalinidad por encima del valor recomendado llegando a un máximo de 134,2 mgCaCO<sub>3</sub>/L con la dosís de 250 mg/L y la concentración del 1% del alcalinizante, aunque la dureza cálcica presentó un comportamiento similar al del NaOH; pese a lo anterior las demás condiciones evaluadas no alcanzaron los valores recomendados para el ajuste de pH: el ISL fue siempre inferior a 0 (agua insaturada) lo que indica una tendencia de agua corrosiva. La relación Alcalinidad/Cl<sup>-</sup> + SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, si bien presentó una tendencia superior a la lograda con el NaOH (llegando a un máximo de 3:1) tampoco llegó al mínimo recomendado de 5:1. En este caso el pH fue una de las variables que no contribuyó al ajuste de pH debido a que no se alcanzó con este alcalinizante el valor de saturación (8.7 -9.0 Unidades); por lo tanto, al igual que el NaOH, el NaHCO<sub>3</sub> no cumplió con todas las condiciones evaluadas, aunque también muestra potencial para generar valores mayores de alcalinidad y de ISL respecto a la evaluada histórica y actualmente en la PTAP, pero no para incrementar la dureza cálcica.

En general no se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones de 1% y 4% para un mismo alcalinizante, cualquiera de estas podría utilizarse en el proceso de ajuste de pH del agua tratada del río Cauca. Al ser este estudio de carácter exploratorio sus resultados pueden ser utilizados como insumos en investigaciones posteriores que permitan definir concentraciones y dosís de alcalinizantes que conduzcan a la optimización del proceso de ajuste de pH del agua tratada del río Cauca producida por la PTAP Puerto Mallarino.

## 8 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con la investigación para optimizar el proceso de ajuste de pH del agua tratada del río Cauca producida por la PTAP Puerto Mallarino, asegurando el permanente cumplimiento de la normatividad colombiana y la protección de cada uno de los componentes del SAAP.

Es pertinente que futuros estudios para evaluar el proceso de ajuste de pH del agua tratada del río Cauca incluyan además del NaOH y del  $\text{NaHCO}_3$  otros alcalinizantes como el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  o la combinación de alcalinizantes tales como NaOH y  $\text{NaHCO}_3$  (para incrementar pH y alcalinidad respectivamente), o bases fuertes con  $\text{CO}_2$  que permitan generar resultados que cumplan con las condiciones evaluadas en este estudio (normatividad, valores de alcalinidad y calcio, ISL, alcalinidad/ $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ ) y por ende un mejor ajuste del pH. Evaluarse los alcalinizantes a otras concentraciones además del 1% y 4% y con un rango de dosis más amplio puede ser considerado también con el fin de tener un abanico de opciones más completo. Adicional a lo anterior, puede estudiarse el incremento de la alcalinidad desde la fuente de abastecimiento y el uso de otro tipo de coagulante, como alternativas para generar valores adecuados de pH y alcalinidad a la salida de la PTAP.

Es recomendable realizar un completo análisis de costos teniendo en cuenta tanto costos de capital como costos operacionales a escala real y que considere además de lo económico, ventajas y limitaciones de cada alcalinizante relacionadas con la configuración del sistema, la simplicidad, la fiabilidad, impactos secundarios, entre otros, de manera tal que oriente a una selección más apropiada del alcalinizante para el ajuste de pH del sistema específico en estudio.

Teniendo en cuenta que las tuberías de plástico actualmente conforman alrededor del 54% de las tuberías instaladas alrededor del mundo para el transporte de agua potable (Vasile et al., 2012) y que el PVC es un material de tubería adecuado para los SDA, con buena resistencia a la corrosión; se considera pertinente evaluar la alternativa de continuar renovando en la ciudad las tuberías de hierro (fundido y galvanizado) y asbesto cemento, que además de favorecer la lixiviación de metales son las tuberías más antiguas de la ciudad (38 – 60 años), por tuberías con este tipo de material (PVC), manteniendo de igual manera valores de pH y alcalinidad del agua tratada que no favorezcan la liberación de metales como el hierro.

Es recomendable además que futuros ajustes a la normatividad Colombiana en agua potable consideren la ampliación de los límites de pH permisibles, de tal manera que éste no sea un limitante para emplear alcalinizantes en dosis que permitan alcanzar valores de alcalinidad satisfactorios y de  $\text{ISL} > 0$ , permitiendo llevar a cabo un control más eficaz de la corrosión en el SDA. Como ejemplo de lo anterior a nivel de América Latina, la normatividad de calidad de agua potable de Brasil establece un rango de pH entre 6.5 - 9.5 unidades.

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMEC Earth & Environmental (2011) Study on pH Adjustment Systems and Recommendations for Design and Operational Guidelines Task 7 Study Report. Department of Environment and Conservation, Newfoundland and Labrador, Canadá.

AMTA - American Membrane Technology Association (2010) *Membrane Post Treatment* (FS-16), Florida.

APHA-AWWA-WEF (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters. 21st Edition. American public Health Association/American Water Works Association/Water Environmental Federation, Washington, D.C, USA.

ARJONA-RODRÍGUEZ, S., TORRES-LOZADA, P., CRUZ-VÉLEZ, C., LOAIZA-CADAVID, D., ESCOBAR-RIVERA, J. (2012). Efecto del punto de precloración sobre la formación de trihalometanos en procesos convencionales de potabilización de agua. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(20), 57-65.

AWWA - American Water Works Asociation (1996) *Internal corrosion of water distribution systems*, segunda edición, Denver.

AWWA - American Water Works Asociation (2002) *Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria*. Madrid, McGRAW-HILL

AWWA - American Water Works Asociation (2011) *Internal corrosion control in water distribution systems* (M58, primera edición, Denver.

BALLANTYNE, L (2004) Corrosión In Your Distribution System... the Silent Pipe Killer. Gander, Clean and Safe Drinking Water Workshop, CH2MHILL.

BARRENECHEA, A. (2004) Capítulo 1.Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. En: De Vargas, L. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Tomo I. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente–CEPIS–, Organización Panamericana de la Salud–OPS–, Lima, Perú.*

BIRNHACK, L., VOUTCHKOV, N., LAHAV, O (2011) Fundamental chemistry and engineering aspects of post-treatment processes for desalinated water—A review. *Desalination*, 273(1), 6-22.

BOOTH, S. (2011) Technical Memorandum No. 6 Mint Farm Regional Water Treatment Plant Corrosion Control Plan. Longview, Kennedy / Jenks Consultores.

BORDOLOI, S., NATH, S. K., GOGOI, S., & DUTTA, R. K. (2013). Arsenic and iron removal from groundwater by oxidation–coagulation at optimized pH: Laboratory and field studies. *Journal of hazardous materials*, 260, 618-626.

BUENO, K., TORRES, P., DELGADO, L (2014) Monitoreo y medición del ajuste del pH del agua tratada del Río Cauca mediante índices de estabilización. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17 (2), 563 - 575.

CANTECO (2014) Productos: Carbonato de calcio. Disponible en: <http://canteco.wix.com/canteco#!productos>. [consultado 25 mayo 2014].

CARVAJAL, L. F.; GÓMEZ, A.; OCHOA, S. (2008) Simulación de un Lavado Hidráulico en Tuberías para el Control del Crecimiento de Biopelícula. *Dyna*, 74(152), 63-72.

CASEY, T. J. (2009) Water stabilisation and corrosion control. *Aquavarra Research R&D Publications*, Paper 2, (12).

CERRATO, J. M. (2005). Impact of Piping Materials on Water Quality in Tegucigalpa, Honduras. *Doctoral dissertation*, Polytechnic Institute and State University, Virginia.

CHEREMISINOFF, N. P. (2001) *Handbook of water and wastewater treatment technologies*, New Jersey, Butterworth-Heinemann.

CHURCHILL, D. (1997) The Effect of Zinc Orthophosphate and pH/Alkalinity Adjustment on Copper And Lead Leves in Drinking Water. *Maestría de la Ciencia Aplicada*. Publicación de la Universidad British Columbia, Nueva York.

CISPROQUIM (2005) Hoja de datos de seguridad: Hidróxido de sodio. Disponible en: [http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/hidroxido\\_de\\_sodio.pdf](http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/hidroxido_de_sodio.pdf) [consultado 20 junio 2014].

CNE – Consejo Nacional Estupefacientes: Resolución No. 009 DE 1987, Por la cual se reglamenta en el Territorio Nacional la importación, fabricación, distribución, transporte y uso de Acetona, Cloroformo, Éter Etílico, Ácido Clorhídrico y demás sustancias a que hace referencia el literal f) del Artículo 20 de la Ley 30 de 1986, Colombia, 1987.

COLINDRES, A. L. (2010) Evaluación del sistema de potabilización en la Escuela Agrícola Panamericana. *Pregrado en Ingeniería en desarrollo socio-económico y ambiente*. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

CONAGUA - Comisión Nacional Del Agua (2007) *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Mexico, Editor Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

COTORUELO, L.M Y MARQUÉS, M<sup>a</sup>.D (1999) *Tratamiento de aguas. Los metales pesados en las aguas, acciones químicas*. Publicación, Dpto. de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga.

DE SOUSA, C., COLMENARES, M. C. Y CORREIA, A. (2008) Contaminación bacteriológica en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Boletín de Malariología y salud ambiental*, 48(1), 17-26.

DE SOUSA, C., CORREIA, A. Y COLMENARES, M. C. (2010) Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Boletín de Malariología y salud ambiental*, 50(2), 187-196.

DEP - DEPARTMENT OF ENVIROMENTAL PROTECTION (2014) *Drinking Water Plant Operator Certification Training Module 20: Corrosion Control and Sequestering*. Pennsylvania, secretaría de agua potable.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. (2008). *Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água*. São Carlos, Editora LDIBE LTDA.

DOUTERELO, I., HUSBAND, S., & BOXALL, J. B. (2014). The bacteriological composition of biomass recovered by flushing an operational drinking water distribution system. *water research*, 54, 100-114.

DQI – Distribuidora de Químicos Industriales S.A. (2014) Productos. Disponible en: <http://www.dqisa.com/> [consultado 29 enero 2014].

EMCALI (2006) Planta de Potabilización Rio Cauca. *Manual de Operación de la Planta*, Santiago de Cali.

EMCALI (2012) *Informe resultado de aplicación de los estudios técnicos realizados por EMCALI EICE ESP en busca de alternativas para garantizar el suministro continuo de agua potable*. Cali.

EMCALI (2013) Oficio 21.2.564 de octubre 31- 2013: Proposición No. 196. Unidad Estratégica Negocios de Acueducto y Alcantarillado. Departamento de Gestión Administrativa.

ENRIQUEZ, L.G (2012) Evaluación de la presencia de Al, Fe y Mn en el sistema de agua potable de Zamorano. *Pregrado en Ingeniería en desarrollo socio-económico y ambiente*. Zamorano, Honduras.

EPA - Environmental Protection Agency (1992) Lead and Copper Rule Guidance Manual. Volume 2. Corrosion control treatment, American Water Works Association, Denver, CO.

EPA – Environmental Protection Agency (2004) Report: Desktop Corrosion Control Study. Philadelphia P A.

EPA– Environmental Protection Agency (2014) Drinking Water Parameters: Microbiological, Chemical and Indicator Parameters in the 2014. Drinking Water Regulations 2014. Wexford, Irlanda.

ESCOBAR, J.C., TORRES-LOZADA, P., CRUZ, C., & PÉREZ, A. (2010) Impacto en el aseguramiento de la calidad del agua potable por eventos extremos de caída de oxígeno disuelto en la fuente de abastecimiento. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

*En Memorias XXXII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS*, Punta Cana, República Dominicana.

ESVELT, M. (2010) Project Report: Corrosion control study and recommendations. Spokane – WA, Esvelt Environmental engineering.

FERNÁNDEZ, P.; DÍAZ, P (2001) *Relación entre variables cuantitativas*. Cad Aten Primaria.  
FERNÁNDEZ, J.M., (2012) Validación de los Ensayos de Alcalinidad, Cloruros y Dureza en el Agua Tratada y Cruda en la Planta de Tratamiento de Empocabal (Santa Rosa de Cabal). Pregrado Química Industrial, Escuela de Química, Universidad Tecnológica De Pereira. Pereira, Colombia.

FRESE, S.D., TROLLIP, D. L AND NOZAIC D J (2003) Manual For Testing of Water and Wastewater Treatment Chemicals. Pietermaritzburg, Umgeni Water.

FSC ARCHITECTS &C ENGINEERS (2003) *Class II Water Treatment Plant Operator Program Manual*. Yellowknife, FSC Project Number: 2003-0070.

GALVIS, A. Y VARGAS, V. (2004) *Selección de tecnología en el tratamiento de agua para consumo humano*. Simposio Internacional de Tecnologías Alternativas en Agua y Saneamiento para Pequeñas Localidades., Lima, Perú, 12.

GARCÍA, R, P. (2010) Caracterización del Agua Recirculada y Optimización de la Dosificación de Lechada de Cal en el Agua Residual del Ingenio Risaralda S.A. *Tecnología Química, Escuela de Química, Universidad Tecnológica De Pereira*. Pereira, Colombia.

GÓMEZ-GÓMEZ, M.; DANGLLOT-BANCK, C.; VEGA-FRANCO, L. (2013). Cómo seleccionar una prueba estadística. *Revista Mexicana de Pediatría*, 80(1), 30-34.  
GQ-GOUVERNEMENT DU QUÉBEC; *Guide de conception des installations de production d'eau potable*. Volume 2. Modifié le 4 décembre 2006, (en línea). <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/index.htm>. Acceso: Mayo 25 de 2013.

GRAMAJO (2004) Determinación de la Calidad del Agua para Consumo Humano y Uso Industrial, Obtenida de Pozos Mecánicos en la Zona 11, Mixco, Guatemala. *Pregrado Ingeniería Química*, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala.

GRAY, N. F. (2008). *Drinking water quality. Problems and solutions*. Segunda edición, Unites States, Cambridge University Press.

GRUPO CALIDRA (2007) Hoja de seguridad: Hidróxido de calcio. Disponible en: <http://calidra.com/wp-content/uploads/pdf/MSDSCalHidratadaVer07.pdf>, [consultado 12 mayo 2014].

HELVECIA S.A.S. (2014) Productos Comercializadora Helvecia. Disponible en: <http://www.comercializadorahelvecia.com/> [consultado 2 febrero 2014].

HENAO, L. N. (2009) Eventos de coloración del agua potable como consecuencia del desprendimiento de biopelículas: el caso de Bogotá. *Disertación Doctoral*, Universidad de los Andes, Bogotá.

HILLEBOE, H. 2006. *Manual de tratamiento de aguas*. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, Nueva York, Edit. Limusa S.A.

HTEC SYSTEMS, INC (2005) Carbonate chemistry affecting production of beverage still water. 561 Congress Park Drive Dayton, Ohio.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2001) *El Medio Ambiente en Colombia*., Bogotá. 2da ed., Bogotá, IDEAM., 151-156.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2014) Variabilidad diaria de la temperatura. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/variabilidad-diaria-temperatura> [consultado 30 junio 2014].

IMRAN, S.A.; DIETZ, J.D.; MUTOTI, G.; TAYLOR, J.S.; RANDALL, A.A. (2005). Modified Larsons Ratio incorporating temperature, water age, and electroneutrality effects on red water release. *J. Environmental Engineering*, 131(11), 1514-1520.

JAEGER, Y., KITTEL, J., BARON, J., & LEROY, P. (2004) Comparison of water treatments used to reduce the aggressiveness of soft waters. *CRECEP*, 144-156.

JCYL - JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN (2009) *Manual de tratamientos del agua de consumo humano*. Consejería de sanidad, Comunidad autónoma Castilla y León.

JIMÉNEZ – BOTERO, G.A., Y SOTO – DUQUE, A. (2014) Análisis del riesgo ambiental potencial por compuestos orgánicos presentes en aguas del río cauca, a su paso por la zona urbana de la ciudad de cali (colombia). *Maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente*. Universidad de Manizales, Manizales.

KIM, D., KIM, D. Y., HONG, S., KIM, J., KIM, C. (2008) Development and implementation of a corrosion control algorithm based on calcium carbonate precipitation potential (CCPP) in a drinking water distribution system, *Journal of water supply: Research and Technology. AQUA*, 57(7), 531-539.

KIRMEYER, G. J. (Ed.) (2000) *Distribution system water quality changes following corrosion control strategies*. American Water Works Association.

KUEHL O. R. (2001) *Diseño de Experimentos, Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones*. Segunda edición, Thomson Learning.

LABIOD, K Y GHIZELLAOUI, S. (2012) Contribution to the inhibitors methods study of the scaling: Chemical, electrochemical processes in the presence of  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . *Energy Procedia*, (18), 1541-1556.

LAHAV, O., SALOMONS, E., OSTFELD, A. (2009) Chemical stability of inline blends of desalinated surface and groundwaters. The need for higher alkalinity values in desalinated water. *Desalination*, 239(1-3), 334-345.

LEÓN-SALAZAR, M. C., MOREANO, M. H. R MUÑOZ, L. D., TABORDA, G., DELGADO, L. G. (2014). Efecto de turbiedades bajas sobre los procesos de coagulación-floculación en la planta de potabilización de puerto mallarino-cali. *Tecno-Lógica*, 18(2), 69-76.

LETTERMAN R. (2001). *Water Quality and Treatment*. 5th edition, New York, Ed. McGraw-Hill, INC.

LIANG, J., DENG, A., XIE, R., GOMEZ, M., HU, J., ZHANG, J. ADIN, A. (2013). Impact of seawater reverse osmosis (SWRO) product remineralization on the corrosion rate of water distribution pipeline materials. *Desalination*, 311, 54-61.

LIU, H., KENNETH, S., CHING-YU, P., JOHN, F., ERIK, D., PAUL, M., HEIDI, L., GREGORY, V. (2013) Effects of blending of desalinated and conventionally treated surface water on iron corrosion and its release from corroding surfaces and pre-existing scales. *Water Research*, 47(11), 3817-3826.

LORENZO - ACOSTA, Y. (2006) Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA, Sobre los derivados de la caña de azúcar*, (40)2, 10-17.

LOZANO, P.A (2006) Optimización del proceso de apagado de cal y estudio del acondicionamiento del pH con solución saturada de cal para la planta de potabilización Puerto Mallarino. *Pregrado Ingeniería Sanitaria*, Universidad del Valle. Cali, Valle.

MADDISON, L.A., GAGNON, G. A Y EISNOR, J. D. (2001) Corrosion control strategies for the Halifax regional distribution system. *J. Civil Engineering*, 28(2), 305-313.

MANHARAWY, S. Y HAFEZ, A. (2002) Study of seawater alkalization as a promising RO pretreatment method. *Desalination*, (153), 109-120.

MARÍN- GALVÍN, R. (1995) *Análisis de aguas y ensayos de tratamiento*. Barcelona, Pacmer SA.

MATILAINEN, A., VPSALAINEN, M., SILLANPAA, M. (2010) Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in colloidal and Interface Science*, 159(2), 189-197.

McCLINTOCK, A. (2013) *Investigating Galvanic Corrosion in Low-Alkalinity water: the Effects of pH, High Dose Corrosion Inhibitors, and Dissolved Inorganic Carbon*. Nova Scotia, Dalhousie University Halifax.

MERRICK AND COMPAÑY (2013). Baca Grande Water & Sanitation District, Corrosion Control Study. Crestone, Colorado, McLaughlin Water Engineers.

MERRILL, T. Y SANKS, R. (1977) Corrosion control by deposition of  $\text{CaCO}_3$  films: part 1, a practical approach for plants operators. *Journal AWWA*, (69)12, 634-640.

MILACRON Mexicana Sales, S.A. de CV. (2004) Reporte técnico: Control de la Corrosión. Querétaro, México, division CIMCOOL.

MOHD - JALIL, A. (2003) Limestone Contactors as a Corrosion Control Technology For Small Public Water Systems: An Educational Module for Drinking Water Professionals. *Maestría en Ciencias*, Knoxville, Universidad de Tennessee.

MONTEC - Montajes Técnicos de Colombia S.A.S. Hoja de seguridad Cal viva. Disponible en: <http://www.enataraxia.com> [consultado 20 junio 2014].

MONTOYA, C., LOAIZA, D., TORRES, P., CRUZ, C. H., ESCOBAR, J.C. (2011) Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia)*, 16, 137-148.

MORA V. Y CEDEÑO J. (2006) Evaluación de la Corrosión e Incrustaciones en Instalaciones Hidráulicas de una Planta de Potabilización en el Estado Bolívar, Venezuela. *Boletín de Malariología y salud ambiental*, (46), 67-78.

MPS – Ministerio De Protección Social; MAVDT – Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). Resolución 2115 de 2007. República de Colombia.

MUÑOZ, N.; SÁNCHEZ, L. D.; DELGADO, L. (2007). Caracterización microbiológica y fisicoquímica de la red baja de la ciudad de Cali. Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio (p. 578). Universidad del Valle.

NEIRA – GUTIERRES, M.A. (2006) Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. estudio de caso: chile. *Pregrado Ingeniería civil*. Santiago de Chile, Universidad de Chile.

NHMRC/ARMCANZ (2004) Australian Drinking Water Guidelines, Fact Sheets 17a–17d. Canberra, National Health and Medical Research Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand.

NIQUETTE, P., SERVAIS, P., SAVOIR, R. (2000). Impacts of pipe materials on densities of fixed bacterial biomass in a drinking water distribution system. *Water research*, 34(6), 1952-1956.

NOEL, J., WANG, Y., GIAMMAR, D. (2014). Effect of Water Chemistry on the Dissolution Rate of the Lead Corrosion Product Hydrocerussite. *Water Research*, 54, 237-246.

OMS – Organización Mundial de la Salud (2004) *Guías para la calidad de agua potable*, Tercera edición.

ONTARIO (2009) Guidance Document for Preparing Corrosion Control Plans for Drinking Water Systems. Safe Drinking Water Branch, Queen's Printer for Ontario, Toronto.

ORELLANA, R (2005) Características del agua potable. Unidad temática N° 3. Buenos Aires, *Ingeniería sanitaria*, Universidad Tecnológica Nacional.

PDA – Plan Departamental del Agua (2008). Valle del Cauca, Municipio: Santiago de Cali. Informe de Diagnostico en abastecimiento de agua y saneamiento básico en el Área Urbana

PACHECO- SECADES, V. (2004) Capítulo 6. Control de calidad. En: De Vargas, L. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Tomo I. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente–CEPIS–, Organización Panamericana de la Salud–OPS–, Lima, Perú.*

PECHEUX, A.P., DEMOCRATE, C., HOUSSAIS, B., GATEL, D., CAVARD, J. (2001) controlling the corrosiveness of blended waters. *Desalination*, (138)1-3, 237-249.

PENALVA, M.A., SABOGAL, L.P. Y DANIEL, L. A. (2013) Capítulo 17 – Tratamiento de água para consumo humano. *Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia E Gestão*, 405-453.

PÉREZ-CARMONA, R. (2005) *Agua desagües y gas para edificaciones*, Cuarta edición, Bogotá, Ecoe Ediciones.

PÉREZ, A., TORRES, P. (2008) Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 10(2), 41-52.

PÉREZ- VIDAL, A., DELGADO- CABRERA, L., TORRES- LOZADA, P. (2012) Evolución y perspectivas del sistema de abastecimiento de la ciudad de Santiago de Cali frente al aseguramiento de la calidad del agua potable. *Ingeniería y competitividad*, 14(2), 69-81.

PROCECAL (2009). Ficha técnica Cal viva e hidratada industrial tipo N. Disponible en: <http://www.procecal.com/home.html> [consultado 29 enero 2014].

PROCECAL (2014) Productos. Disponible en: <http://www.procecal.com/> [consultado 28 enero 2014].

QMAX S.A.<sup>a</sup>. (2011) Hojas de datos de seguridad de sustancias. Carbonato de Sodio. Disponible en: <http://www.qmaxsolutions.com> [consultado 20 junio 2014].

QMAX S.A.<sup>B</sup>. (2011) Hojas de datos de seguridad de sustancias. Carbonato de Calcio. Disponible en: <http://www.qmaxsolutions.com> [consultado 20 junio 2014].

QUÍMICA BÁSICA S.A (2014) Productos Químicos. Disponible en: [http://www.quimica-basica.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=71&Itemid=500](http://www.quimica-basica.com/index.php?option=com_content&view=article&id=71&Itemid=500) [consultado 28 mayo 2014].

QUIMPAC (2009) Hoja de seguridad Soda caustica. Disponible en: <http://www.quimpac.com.co> [consultado 25 mayo 2014].

QUIMPAC DE COLOMBIA S.A. (2011). Ajuste de pH con soda cáustica líquida en las plantas de tratamiento de agua potable de Rio Cauca y Puerto Mallarino EMCALI EICE ESP. Informe de pruebas de laboratorio y operación a escala real.

QUIMPAC DE COLOMBIA S.A. (2014) Productos: Soda Cáustica. Disponible en: <http://www.quimpac.com.co/> [consultado 28 enero 2014].

RAHMAN, S., GAGNON, G. (2013) Bench-scale evaluation of drinking water treatment parameters on iron particles and water quality. *Water Research*, 48, 137-147.

RAS – Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (2000). Resolución 1096 de 2000, por la cual se adopta el Reglamento. Ministerio de Desarrollo Económico, Colombia.

RENDÓN, W., RIVAS, R. A., LINARES, B. (2012) *Sistema para ajuste de pH en PRECAL Y POSCAL en las plantas de tratamiento de la empresa AGUAS y AGUAS PEREIRA*. Grupo de investigación AGUAS y AGUAS PEREIRA. Pereira, Colombia.

RODRÍGUEZ, A. (2010) La dureza del agua. Seminario: Agua Especialización y maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad Regional Bahía Blanca Universidad Tecnológica Nacional-U.T.N., Bahía Blanca, Argentina.

RUEDA - ARIZA, J. C.; MARTÍNEZ, A. J.; CALVO, D. C. (2013). Efecto del desprendimiento de las biopelículas formadas en una red de acueducto sobre la calidad del agua. *Revista de Ingeniería*, (39), 6-11.

SALLANKO, J, HIETALA, R. LINDSTRÖM, A. KYTÖVAARA AND T. VÄISÄNEN (2013) More efficient alkalisation with ground limestone in groundwater treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 62(3), 183-188.

SÁNCHEZ, G, PUJOL, R., CODA, F. (2010). Planta desalinizadora de agua de mar de 500m<sup>3</sup> diarios de capacidad que funciona mediante ósmosis inversa. *Técnica Industrial*, 287, 44.

SCHOCK, M.R. (2002) Chapter 17. Internal corrosion and deposition control. En: *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. New York, McGraw-Hill, Inc., 17.01–17.109.

SENA –Servicio Nacional de Aprendizaje (1999) *Control de la calidad del agua programa de capacitación y certificación del sector de agua potable y saneamiento básico*, segunda edición, Ministerio de desarrollo económico.

SIGMA-ALDRICH (2012) Hoja técnica de seguridad del material Bicarbonato de sodio. Disponible en: <http://www.sigma-aldrich.com> [consultado 14 junio 2014].

SIGMA-ALDRICH (2013) Hoja técnica de seguridad del material Carbonato de sodio. Disponible en: <http://www.sigma-aldrich.com> [consultado 18 junio 2014].

SKIPTON, S. O.; DVORAK, B. I. (2009) *Drinking Water: Hard Water (Calcium and Magnesium)*, Nebraska, University of Nebraska – Lincoln Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources.

SKIPTON, S. O.; DVORAK, B. I.; WOLDT, W. (2010) *Drinking Water: Sulfur (Sulfate and Hydrogen Sulfide)* Nebraska, University of Nebraska – Lincoln Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources.

SMITS, S., GALVÍS, AL., BERNAL, D.P., CARDONA, D.A. Y VISSCHER, J.T. (2008) *Gobernabilidad e infraestructura hídrica urbana; un caso de estudio de Cali, Colombia. SWITCH Working Paper.*

SNOEYINK V., JENKINS D. (2002) *Química del Agua*, México, Editorial Limusa S.A de C.V.

SPENCER, C. M., BLACK, P. E., POWNAL, V. (2003). *Revised guidance manual for selecting lead and copper control strategies.* US Environmental Protection Agency, Washington, DC.

STUMM, W. & MORGAN, J. J. (1996) *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. John Nueva York, Wiley & Sons.

SUDECAP (2008) Ficha de datos de seguridad: carbonato de calcio malla 400. Disponible en: <http://sudecap.com/wp-content/uploads/2013/05/MSDS-CARBONATO-MALLA-4001.pdf> [consultado 27 junio 2014].

TANG, Z., HONG, S., XIAO, W., & TAYLOR, J. (2006) Impacts of blending ground, surface, and saline waters on lead release in drinking water distribution systems. *Water research*, 40(5), 943-950.

TORRES, P., PÉREZ, A., CAJIGAS, A., OTERO, A. Y GONZÁLEZ, M. (2008) Selección de acondicionadores químicos para el tratamiento anaeróbico de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de la yuca. *Revista Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR)*, (7), 66-74.

TORRES, P., CRUZ, C., PATIÑO, P., ESCOBAR, J.C. Y PÉREZ, A. (2010) Aplicación de índices de calidad de agua -ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. *Ingeniería e investigación*, 30(3), 86-95.

TREJO, R., Y GARCÍA, L. E. (2007) Modelación de la Deriva del pH en Función del Tiempo en Muestras de Agua Potable. *Conciencia Tecnológica*, (033), 12–16.

TRUJILLO - FLORES, E., MARTÍNEZ - MIRANDA, V., FUENTES - GUTIÉRREZ, H. y R. I. D. P. (2003). Tecnología informática para evaluar la agresividad del bióxido de carbono en el agua. *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*, 142-154. CYRA/UAEM.

TRUJILLO, E.; MARTÍNEZ, V.; FLORES, N.S. (2008) Ajuste del Equilibrio Químico del Agua Potable con Tendencia Corrosiva por Dióxido de Carbono. *Información tecnológica*, 19(6), 89 – 101.

UNIT STANDARD 18452 (2002) “Describe drinking water treatment filtration processes, and management of critical points”, National Diploma in Drinking Water Assessment, Tutor Notes and Home Assignment, Otago: Polytechnic.

UNIVERSIDAD DEL VALLE Y EMCALI EICE ESP (2007) Resultados de Investigación en Agua Potable, Aguas Residuales y Biosólidos. Convenio interinstitucional de Cooperación Técnica N° 300-gaa-convenio 149-2005.

VARGAS, A. I., FLOREZ, A., A, GLEEN, L. M. (2009) Evaluación técnica del sistema de tratamiento de agua potable de la Vereda Palo Solo del municipio de Aguazul (Casanare). *Pregrado Especialista en Ingeniería ambiental*, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga.

VARÓ – GALVÁN, P.; CHILLÓN, M. F.; PRATS D. (2004). Características Físicoquímicas de las Aguas Ablandadas. *Ingeniería Química*, Madrid, Universidad de Alicante, 146-150.

VASILE, G., CIUPE, A., DINU, C., GHEORGHE, D., CHIRU, E., & CRUCERU, L. (2012). Evaluation of Drinking Water Quality in Three Municipalities of Romania: The Influence of Municipal and Customer's Distribution Systems Concerning Trace Metals. *INTECH Open Access Publisher*, 458-480.

VERA, N (2007) Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de México. *Pregrado en Ingeniería civil*. México, Escuela Superior De Ingeniería y Arquitectura.

VREEBURG, I. J.; BOXALL, J. B. (2007). Discolouration in potable water distribution systems: A review. *Water research*, 41(3), 519-529.

WHO - World Health Organization (2011) Guidelines for drinking-water quality. Cuarta edición.

ZHAN, W., SATHASIVAN, A., JOLL, C., WAI, G., HEITZ, A., KRISTIANA, I. (2012). Impact of NOM character on copper adsorption by trace ferric hydroxide from iron corrosion in water supply system. *Chemical Engineering Journal*, 200, 122-132.

## 10 ANEXOS

### Anexo 10.1 Datos de monitoreos hechos al agua tratada de la PTAP Puerto Mallarino

| JORNADA  | HORA    | PARAMETROS MONITOREADOS |              |                     |                                                |                                           |                                             |                    |                    |
|----------|---------|-------------------------|--------------|---------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------|--------------------|
|          |         | Turbiedad<br>(UNT)      | pH<br>(Unid) | Temperatura<br>(°C) | Alcalinidad Total<br>mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Dureza total<br>mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Dureza cálcica<br>mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Cloruros<br>(mg/L) | Sulfatos<br>(mg/L) |
| MARZO 12 | 9:15AM  | 0,154                   | 7,54         | 25,5                | 26,4                                           | 49,7                                      | 34,6                                        | -                  | -                  |
|          | 10:30AM | 0,240                   | 7,58         | 25,7                | 26,1                                           | 50,0                                      | 30,7                                        | -                  | -                  |
|          | 11:40AM | 0,203                   | 7,67         | 25,5                | 27,2                                           | 57,0                                      | 35,5                                        | -                  | -                  |
|          | 1:28PM  | 0,140                   | 7,54         | 25,6                | 29,4                                           | 49,8                                      | 32,3                                        | 17,24              | 11,7               |
| MARZO 15 | 9:00AM  | 0,260                   | 6,77         | 24,1                | 15,8                                           | 38,7                                      | 25,9                                        | -                  | -                  |
|          | 10:14AM | 0,140                   | 7,69         | 24,0                | 22,4                                           | 42,3                                      | 34,6                                        | -                  | -                  |
|          | 11:07AM | 0,218                   | 7,58         | 23,9                | 20,7                                           | 49,4                                      | 33,4                                        | -                  | -                  |
|          | 11:50AM | 0,155                   | 7,87         | 24,0                | 22,9                                           | 45,9                                      | 35,7                                        | -                  | -                  |
|          | 12:50AM | 0,144                   | 7,64         | 23,9                | 21,2                                           | 45,2                                      | 32,9                                        | -                  | -                  |
|          | 1:30PM  | 0,153                   | 7,60         | 24,0                | 21,6                                           | 44,5                                      | 34,6                                        | 20,16              | 14,9               |
| ABRIL 12 | 9:46AM  | 0,148                   | 7,04         | 24,7                | 25,8                                           | 45,7                                      | 33,0                                        | -                  | -                  |
|          | 10:41AM | 0,213                   | 6,97         | 24,2                | 11,9                                           | 35,4                                      | 17,6                                        | 14,6               | 13,6               |
|          | 11:35AM | 0,190                   | 6,91         | 24,3                | 21,7                                           | 45,0                                      | 30,3                                        | -                  | -                  |
|          | 12:11PM | 0,169                   | 6,84         | 24,3                | 22,6                                           | 44,4                                      | 30,1                                        | -                  | -                  |
|          | 12:51PM | 0,175                   | 6,96         | 24,5                | 24,3                                           | 47,3                                      | 26,2                                        | -                  | -                  |
| ABRIL 15 | 9:00AM  | 0,215                   | 7,67         | 23,5                | 25,3                                           | 47,9                                      | 33,9                                        | -                  | -                  |
|          | 9:37AM  | 0,150                   | 7,32         | 23,9                | 22,0                                           | 46,2                                      | 33,5                                        | -                  | -                  |
|          | 10:31AM | 0,213                   | 7,42         | 24,6                | 21,8                                           | 49,6                                      | 34,8                                        | 17,4               | 11,2               |
|          | 11:09AM | 0,193                   | 8,07         | 23,1                | 19,7                                           | 48,0                                      | 32,8                                        | -                  | -                  |
|          | 11:50AM | 0,182                   | 7,98         | 25,0                | 19,4                                           | 49,1                                      | 34,5                                        | -                  | -                  |
| ABRIL 22 | 10:45AM | 0,261                   | 7,17         | 22,7                | 19,3                                           | 49,7                                      | 37,0                                        | -                  | -                  |
|          | 11:18AM | 0,348                   | 7,21         | 22,8                | 18,8                                           | 49,8                                      | 36,0                                        | 14,6               | 13,4               |
|          | 11:47AM | 0,244                   | 7,59         | 22,8                | 20,2                                           | 50,3                                      | 38,8                                        | -                  | -                  |
|          | 12:16PM | 0,216                   | 7,93         | 23,2                | 20,6                                           | 50,3                                      | 38,5                                        | -                  | -                  |
|          | 12:45PM | 0,225                   | 8,11         | 23,1                | 20,3                                           | 51,0                                      | 38,3                                        | -                  | -                  |
| ABRIL 26 | 9:46AM  | 0,491                   | 6,73         | 23,4                | 17,6                                           | 41,7                                      | 27,5                                        | -                  | -                  |
|          | 10:21AM | 0,496                   | 6,63         | 23,5                | 16,3                                           | 44,3                                      | 28,1                                        | -                  | -                  |
|          | 11:00AM | 0,710                   | 7,00         | 23,6                | 19,8                                           | 44,8                                      | 29,8                                        | 14,6               | 10,0               |
|          | 11:37AM | 0,827                   | 7,23         | 23,4                | 20,5                                           | 44,7                                      | 29,2                                        | -                  | -                  |
|          | 12:18PM | 1,140                   | 7,56         | 23,6                | 22,4                                           | 45,0                                      | 33,8                                        | -                  | -                  |

### Anexo 10.2 Datos obtenidos en los ensayos de dosificación con NaOH

| CONDICIONES                                                             | PARAMETRO                                    | Valor Recomendado           | Dosis (mg/L)NaOH 1% |       |       |       |       |       |       | Dosis (mg/L)NaOH 4% |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                         |                                              |                             | 0                   | 2     | 4     | 6     | 8     | 10    | 20    | 2                   | 4     | 6     | 8     | 10    | 20    |
| CUMPLIMIENTO DE LA RES. 2115 DE 2007                                    | Turbiedad (UNT)                              | < 2 *                       | 0.21                | 0.37  | 0.36  | 0.35  | 0.34  | 0.84  | 0.98  | 0.76                | 0.96  | 0.98  | 1.02  | 1.02  | 1.06  |
|                                                                         | pH (Unidades)                                | (6.5 – 9.0)*<br>(6.5-9.3)** | 6.10                | 6.63  | 7.02  | 7.70  | 8.77  | 9.27  | 10.02 | 6.33                | 7.05  | 8.23  | 9.09  | 9.41  | 10.16 |
|                                                                         | Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)         | < 200 *<br>>40**            | 6.30                | 6.80  | 9.0   | 11.0  | 13.0  | 16.0  | 28.0  | 6.7                 | 11.0  | 14.0  | 16.0  | 19.0  | 31.0  |
|                                                                         | Dureza total (mgCaCO <sub>3</sub> /L)        | < 300*<br>40-60 **          | 28.4                | 30.4  | 31.0  | 31.0  | 31.0  | 31.0  | 31.4  | 29.6                | 29.6  | 29.6  | 29.6  | 29.6  | 32.4  |
|                                                                         | Dureza Cálrica (mgCaCO <sub>3</sub> /L)      | >40**                       | 16,2                | 18.0  | 18.2  | 18.2  | 18.2  | 19.2  | 19.4  | 17.4                | 17.4  | 17.6  | 17.6  | 17.6  | 20.2  |
|                                                                         | Calcio (mg Ca <sup>++</sup> /L)              | < 60 *<br>>40**<br>>16**    | 6.49                | 7.21  | 7.29  | 7.29  | 7.29  | 7.70  | 7.78  | 6.97                | 6.97  | 7.05  | 7.05  | 7.05  | 8.10  |
|                                                                         | Cloruros (mgCl <sup>-</sup> /L)              | < 250 *<br>< 50**           | 21.7                | 23.6  | 21.7  | 24.6  | 23.6  | 25.5  | 25.5  | 23.6                | 25.5  | 24.6  | 26.4  | 23.6  | 26.4  |
|                                                                         | Sulfatos (mgSO <sub>4</sub> <sup>=</sup> /L) | < 250*<br>>50**             | 7.10                | 2.4   | 1.0   | 2.2   | 4.9   | 7.8   | 7.5   | 6.3                 | 6.5   | 9.0   | 8.7   | 8.7   | 9.2   |
|                                                                         | Sodio(mg/l)                                  | 200*                        | 3.5                 | 4.0   | 6.0   | 7.2   | 8.5   | 9.7   | 16.2  | 3.0                 | 5.6   | 7.3   | 8.7   | 10    | 17.1  |
|                                                                         | Conductividad (uS/cm)                        | < 1000*                     | 107.7               | 109.9 | 115.1 | 119.8 | 125.6 | 130.7 | 162.6 | 107.1               | 115.7 | 121.4 | 127.7 | 133.3 | 170.0 |
|                                                                         | Temperatura (°C)                             | -                           | 22,2                | 22,3  | 22,1  | 22,2  | 22,2  | 22,2  | 22,3  | 22,3                | 22,2  | 22,3  | 22,2  | 22,2  | 22,2  |
| EVALUACIÓN ISL                                                          | ISL <0<br>ISL=0<br>ISL>0                     | 0.2<br>0.2-0.5<br>0.2-1.0   | -3.54               | -2.97 | -2.46 | -1.69 | -0.57 | 0.02  | 0.88  | -3.29               | -2.36 | -1.08 | -0.18 | 0.19  | 1.03  |
| EVALUACIÓN ALCALINIDAD / CL <sup>-</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> | -                                            | ≥ 5:1                       | 0.17                | 0.19  | 0.28  | 0.30  | 0.34  | 0.36  | 0.64  | 0.17                | 0.26  | 0.32  | 0.35  | 0.45  | 0.66  |

\*Resolución 2115 de 2007; \*\*Merrill y Sanks (1977); RAS (2000); Gray, 2008; Esvelt (2010); WHO (2011); Varó et al. (2004); Imran et al. (2005); De Sousa et al. (2010).

### Anexo 10.3 Datos obtenidos en los ensayos de dosificación con $\text{NaHCO}_3$

| CONDICIONES                                                             | PARAMETRO                                    | Valor Recomendado           | Dosis (mg/L) $\text{NaHCO}_3$ 1% |       |       |       |       |       |       | Dosis (mg/L) $\text{NaHCO}_3$ 4% |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                         |                                              |                             | 0                                | 10    | 20    | 50    | 130   | 200   | 250   | 10                               | 20    | 50    | 130   | 200   | 250   |
| CUMPLIMIENTO DE LA RES. 2115 DE 2007                                    | Turbiedad (UNT)                              | < 2 *                       | 0.21                             | 0.47  | 0.61  | 0.62  | 0.67  | 0.81  | 0.99  | 0.62                             | 0.64  | 0.68  | 0.70  | 0.81  | 0.91  |
|                                                                         | pH (Unidades)                                | (6.5 – 9.0)*<br>(6.5-9.3)** | 6.10                             | 6.61  | 6.77  | 7.07  | 7.51  | 7.80  | 8.01  | 6.68                             | 6.83  | 7.16  | 7.60  | 7.82  | 8.06  |
|                                                                         | Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)         | < 200 *<br>>40**            | 6.30                             | 11.0  | 12.0  | 27.0  | 69.8  | 103.6 | 134.2 | 10.2                             | 12.0  | 25.0  | 51.4  | 90.0  | 127.0 |
|                                                                         | Dureza total (mgCaCO <sub>3</sub> /L)        | < 300*<br>40-60 **          | 28.4                             | 33.6  | 35.8  | 36.4  | 36.4  | 37.0  | 38.2  | 31.4                             | 32.6  | 32.6  | 32.6  | 33.2  | 33.4  |
|                                                                         | Dureza Cálcica (mgCaCO <sub>3</sub> /L)      | >40**                       | 16,2                             | 18.6  | 20.6  | 24.4  | 24.6  | 25.2  | 26.6  | 19.4                             | 19.6  | 20.6  | 20.8  | 21.2  | 21.4  |
|                                                                         | Calcio (mg Ca <sup>++</sup> /L)              | < 60 *<br>>40**<br>>16**    | 6.49                             | 7.45  | 8.26  | 9.78  | 9.86  | 10.10 | 10.66 | 7.78                             | 7.86  | 8.26  | 8.34  | 8.50  | 8.58  |
|                                                                         | Cloruros (mgCl <sup>-</sup> /L)              | < 250 *<br>< 50**           | 21.7                             | 24.6  | 26.4  | 25.5  | 24.6  | 25.5  | 25.5  | 24.6                             | 25.5  | 26.4  | 25.5  | 26.4  | 26.4  |
|                                                                         | Sulfatos (mgSO <sub>4</sub> <sup>-</sup> /L) | < 250*<br>>50**             | 7.10                             | 5.9   | 7.8   | 2.1   | 7.8   | 5.6   | 7.8   | 5.1                              | 4.4   | 4.9   | 4.6   | 4.3   | 8.1   |
|                                                                         | Sodio(mg/l)                                  | 200*                        | 3.5                              | 5.1   | 8.2   | 16.3  | 38.5  | 59.1  | 68.8  | 6.5                              | 12.1  | 17.3  | 37.6  | 52.4  | 65.3  |
|                                                                         | Conductividad (uS/cm)                        | < 1000*                     | 107.7                            | 118.2 | 128.6 | 158.8 | 238.0 | 303.0 | 355.0 | 116.0                            | 125.8 | 157.2 | 237.0 | 285.0 | 358.0 |
|                                                                         | Temperatura (°C)                             | -                           | 22,2                             | 21,9  | 21,9  | 21,9  | 21,9  | 21,9  | 22,0  | 21,4                             | 21,4  | 21,4  | 21,4  | 21,5  | 21,5  |
| EVALUACIÓN ISL                                                          | ISL <0<br>ISL=0<br>ISL>0                     | 0.2<br>0.2-0.5<br>0.2-1.0   | -3.54                            | -2.78 | -2.54 | -1.82 | -0.99 | -0.54 | -0.20 | -2.73                            | -2.51 | -1.85 | -1.11 | -0.65 | -0.28 |
| EVALUACIÓN ALCALINIDAD / CL <sup>-</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | -                                            | ≥ 5:1                       | 0.17                             | 0.27  | 0.26  | 0.71  | 1.63  | 2.48  | 3.05  | 0.26                             | 0.30  | 0.59  | 1.26  | 2.16  | 2.78  |

\*Resolución 2115 de 2007; \*\*Merrill y Sanks (1977); RAS (2000); Gray, 2008; Esvelt (2010); WHO (2011); Varó et al. (2004); Imran et al. (2005); De Sousa et al. (2010)

#### Anexo 10.4 Datos de las réplicas de los ensayos de dosificación con NaOH y NaHCO<sub>3</sub>

| ALCALINIZANTE           | DOSIS | Turbiedad<br>(UNT) | pH<br>(Unid.) | Alcalinidad<br>Total<br>mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Dureza<br>total<br>mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Dureza<br>cálcica<br>mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | Calcio<br>(mg/L) | Conductividad<br>(uS/cm) | Temperatura<br>(°C) |
|-------------------------|-------|--------------------|---------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|--------------------------|---------------------|
| BLANCO                  | 0,0   | 0,21               | 6,14          | 6,3                                               | 28,4                                         | 16,2                                           | 6,49             | 107,7                    | 22,2                |
| NaOH (1%)               | 2,0   | 0,32               | 6,62          | 7,0                                               | 30,2                                         | 17,6                                           | 7,05             | 109,9                    | 22,2                |
|                         | 4,0   | 0,30               | 6,97          | 10,0                                              | 31,2                                         | 18,3                                           | 7,33             | 114,6                    | 22,3                |
|                         | 6,0   | 0,29               | 7,23          | 12,0                                              | 31,2                                         | 19,2                                           | 7,70             | 118,2                    | 22,4                |
|                         | 8,0   | 0,29               | 8,87          | 15,0                                              | 32,2                                         | 19,2                                           | 7,70             | 125,4                    | 22,4                |
|                         | 10,0  | 0,83               | 9,26          | 17,0                                              | 32,8                                         | 19,4                                           | 7,78             | 130,9                    | 22,5                |
|                         | 20,0  | 0,90               | 10,03         | 30,0                                              | 33,4                                         | 19,4                                           | 7,78             | 162,7                    | 22,5                |
| NaOH (4%)               | 2,0   | 0,70               | 6,35          | 6,6                                               | 31,2                                         | 17,4                                           | 6,97             | 107,1                    | 21,9                |
|                         | 4,0   | 0,82               | 7,12          | 9,0                                               | 31,2                                         | 17,4                                           | 6,97             | 116,0                    | 21,9                |
|                         | 6,0   | 0,93               | 8,17          | 12,0                                              | 31,6                                         | 18,0                                           | 7,21             | 121,2                    | 21,8                |
|                         | 8,0   | 0,97               | 9,03          | 16,0                                              | 32,4                                         | 18,8                                           | 7,54             | 127,1                    | 21,9                |
|                         | 10,0  | 0,98               | 9,39          | 18,0                                              | 32,8                                         | 19,0                                           | 7,62             | 133,0                    | 21,9                |
|                         | 20,0  | 1,01               | 10,14         | 30,0                                              | 32,8                                         | 20,0                                           | 8,02             | 167,7                    | 21,8                |
| NaHCO <sub>3</sub> (1%) | 10,0  | 0,47               | 6,58          | 8,0                                               | 35,2                                         | 21,2                                           | 8,50             | 117,9                    | 21,8                |
|                         | 20,0  | 0,64               | 6,77          | 12,0                                              | 35,4                                         | 21,2                                           | 8,50             | 127,9                    | 21,9                |
|                         | 50,0  | 0,65               | 7,09          | 33,0                                              | 36,0                                         | 21,2                                           | 8,50             | 158,5                    | 21,9                |
|                         | 130,0 | 0,67               | 7,58          | 50,0                                              | 36,2                                         | 24,0                                           | 9,62             | 239,0                    | 21,9                |
|                         | 200,0 | 0,81               | 7,82          | 114,6                                             | 38,8                                         | 24,4                                           | 9,78             | 307,0                    | 21,9                |
|                         | 250,0 | 0,90               | 8,02          | 134,6                                             | 39,2                                         | 25,2                                           | 10,10            | 357,0                    | 21,9                |
| NaHCO <sub>3</sub> (4%) | 10,0  | 0,63               | 6,68          | 13,4                                              | 32,6                                         | 20,6                                           | 8,26             | 115,6                    | 21,7                |
|                         | 20,0  | 0,65               | 6,83          | 16,0                                              | 32,8                                         | 20,9                                           | 8,38             | 126,3                    | 21,7                |
|                         | 50,0  | 0,69               | 7,17          | 31,0                                              | 32,8                                         | 21,4                                           | 8,58             | 156,9                    | 21,8                |
|                         | 130,0 | 0,69               | 7,59          | 77,5                                              | 34,4                                         | 21,8                                           | 8,74             | 236,0                    | 21,7                |
|                         | 200,0 | 0,73               | 7,84          | 103,3                                             | 35,2                                         | 22,1                                           | 8,86             | 294,0                    | 21,7                |
|                         | 250,0 | 0,92               | 7,99          | 126,0                                             | 36,8                                         | 22,3                                           | 8,94             | 343,0                    | 21,7                |

**Anexo 10.5** Calcio calculado para los ensayos de dosificación con NaOH y NaHCO<sub>3</sub>

| ALCALINIZANTE         | DOSIS | EDTA<br>para dureza cálcica<br>(ml) | Calcio<br>calculado<br>(mg/L) |
|-----------------------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Blanco                | 0,0   | 0,81                                | 6,49                          |
| NaOH 1%               | 2,0   | 0,90                                | 7,21                          |
|                       | 4,0   | 0,91                                | 7,29                          |
|                       | 6,0   | 0,91                                | 7,29                          |
|                       | 8,0   | 0,91                                | 7,29                          |
|                       | 10,0  | 0,96                                | 7,70                          |
|                       | 20,0  | 0,97                                | 7,78                          |
| NaOH 4%               | 2,0   | 0,87                                | 6,97                          |
|                       | 4,0   | 0,87                                | 6,97                          |
|                       | 6,0   | 0,88                                | 7,05                          |
|                       | 8,0   | 0,88                                | 7,05                          |
|                       | 10,0  | 0,88                                | 7,05                          |
|                       | 20,0  | 1,01                                | 8,10                          |
| NaHCO <sub>3</sub> 1% | 10,0  | 0,93                                | 7,45                          |
|                       | 20,0  | 1,03                                | 8,26                          |
|                       | 50,0  | 1,22                                | 9,78                          |
|                       | 130,0 | 1,23                                | 9,86                          |
|                       | 200,0 | 1,26                                | 10,10                         |
|                       | 250,0 | 1,33                                | 10,66                         |
| NaHCO <sub>3</sub> 4% | 10,0  | 0,97                                | 7,78                          |
|                       | 20,0  | 0,98                                | 7,86                          |
|                       | 50,0  | 1,03                                | 8,26                          |
|                       | 130,0 | 1,04                                | 8,34                          |
|                       | 200,0 | 1,06                                | 8,50                          |
|                       | 250,0 | 1,07                                | 8,58                          |

**Anexo 10.6** Resumen estadístico (indicadores de tendencia central, de dispersión y de posición) ensayos de dosificación

| VARIABLE                                             |       | Prom. | $\sigma$ | Mín.  | Q1    | Med.  | Q3     | Máx.   | Rango aceptable<br>Res. 2115 2007 | Rango<br>Recomendado         | Referencia<br>bibliográfica                           |
|------------------------------------------------------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|--------|--------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Turbiedad<br/>(UNT)</b>                           | Ens.1 | 0,49  | 0,28     | 0,21  | 0,30  | 0,35  | 0,83   | 0,98   | < 2                               | 0,1 – 0,5                    | WHO (2011)<br>EPA (2014)                              |
|                                                      | Ens.2 | 0,88  | 0,23     | 0,21  | 0,79  | 0,97  | 1,02   | 1,06   |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.3 | 0,65  | 0,20     | 0,21  | 0,54  | 0,65  | 0,81   | 0,99   |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.4 | 0,68  | 0,17     | 0,21  | 0,64  | 0,69  | 0,77   | 0,92   |                                   |                              |                                                       |
| <b>pH<br/>(Unidades)</b>                             | Ens.1 | N/A   | N/A      | 6,10  | 6,80  | 7,70  | 9,27   | 10,03  | 6,5 -9,0                          | 6,5 – 8,5<br>pH s: 8,5 – 9,0 | WHO (2011)<br>Bueno et al. (2014)                     |
|                                                      | Ens.2 | N/A   | N/A      | 6,10  | 6,70  | 8,23  | 9,40   | 10,16  |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.3 | N/A   | N/A      | 6,10  | 6,69  | 7,09  | 7,81   | 8,02   |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.4 | N/A   | N/A      | 6,10  | 6,76  | 7,17  | 7,83   | 8,06   |                                   |                              |                                                       |
| <b>Alcalinidad Total<br/>(mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b> | Ens.1 | 13,93 | 7,534    | 6,300 | 8,000 | 12,00 | 16,50  | 30,0   | < 200                             | 40 - 200                     | Merrill y Sanks (1977)<br>Neira ( 2006)               |
|                                                      | Ens.2 | 15,05 | 8,09     | 6,30  | 7,85  | 14,00 | 18,50  | 31,0   |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.3 | 55,09 | 50,21    | 6,30  | 11,50 | 33,00 | 109,10 | 134,60 |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.4 | 53,01 | 45,83    | 6,30  | 12,70 | 31,00 | 96,65  | 127,00 |                                   |                              |                                                       |
| <b>Dureza Total<br/>(mgCaCO<sub>3</sub>/L)</b>       | Ens.1 | 31,17 | 1,23     | 28,40 | 30,70 | 31,00 | 31,80  | 33,40  | < 300                             | 40-60                        | RAS (2000)                                            |
|                                                      | Ens.2 | 30,83 | 1,50     | 28,40 | 29,60 | 31,20 | 32,40  | 32,80  |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.3 | 35,89 | 2,72     | 28,40 | 35,30 | 36,20 | 37,60  | 38,20  |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.4 | 32,98 | 1,96     | 28,40 | 32,60 | 32,80 | 33,90  | 36,80  |                                   |                              |                                                       |
| <b>Dureza Cálrica<br/>(mgCaCO<sub>3</sub>/L)</b>     | Ens.1 | 18,50 | 0,94     | 16,20 | 18,10 | 18,30 | 19,30  | 19,40  | -                                 | >40                          | Merrill y Sanks (1977)<br>Esvelt (2010)<br>WHO (2011) |
|                                                      | Ens.2 | 18,05 | 1,14     | 16,20 | 17,40 | 17,60 | 18,90  | 20,20  |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.3 | 22,57 | 3,01     | 16,20 | 20,90 | 24,00 | 24,90  | 26,60  |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.4 | 20,64 | 1,59     | 16,20 | 20,10 | 20,90 | 21,60  | 22,30  |                                   |                              |                                                       |
| <b>Calcio<br/>(mg/L)</b>                             | Ens.1 | 7,41  | 0,38     | 6,49  | 7,25  | 7,335 | 7,74   | 7,78   | < 60                              | >16                          | Merrill y Sanks (1977)<br>Esvelt (2010)<br>WHO (2011) |
|                                                      | Ens.2 | 7,23  | 0,46     | 6,49  | 6,97  | 7,05  | 7,58   | 8,10   |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.3 | 9,05  | 1,21     | 6,49  | 8,38  | 9,62  | 9,98   | 10,66  |                                   |                              |                                                       |
|                                                      | Ens.4 | 8,27  | 0,64     | 6,49  | 8,06  | 8,38  | 8,66   | 8,94   |                                   |                              |                                                       |

**Continuación** Anexo 10.6 Resumen estadístico (indicadores de tendencia central, de dispersión y de posición) ensayos de dosificación

| VARIABLE                        |       | Prom.  | $\sigma$ | Mín.   | Q1     | Med.   | Q3     | Máx.   | Rango aceptable<br>Res. 2115 2007 | Rango<br>Recomendado                 | Referencia<br>bibliográfica |
|---------------------------------|-------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Cloruros</b><br>(mg/L)       | Ens.1 | 23,74  | 1,60     | 21,70  | 21,70  | 23,60  | 25,50  | 25,50  | < 250                             | < 50                                 | Gray (2008)                 |
|                                 | Ens.2 | 24,54  | 1,72     | 21,70  | 23,60  | 24,60  | 26,40  | 26,40  |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.3 | 24,83  | 1,51     | 21,70  | 24,60  | 25,50  | 25,50  | 26,40  |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.4 | 25,21  | 1,69     | 21,70  | 24,60  | 25,50  | 26,40  | 26,40  |                                   |                                      |                             |
| <b>Sulfatos</b><br>(mg/L)       | Ens.1 | 4,70   | 2,84     | 1,00   | 2,20   | 4,90   | 7,50   | 7,80   | < 250                             | < 50                                 | Gray (2008)                 |
|                                 | Ens.2 | 7,93   | 1,25     | 6,30   | 6,50   | 8,70   | 9,00   | 9,20   |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.3 | 6,30   | 2,07     | 2,10   | 5,60   | 7,10   | 7,80   | 7,80   |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.4 | 5,50   | 1,49     | 4,30   | 4,40   | 4,90   | 7,10   | 8,10   |                                   |                                      |                             |
| <b>Sodio</b><br>(mg/L)          | Ens.1 | 7,87   | 4,30     | 3,50   | 4,00   | 7,200  | 9,700  | 16,20  | -                                 | < 200 mg/L                           | WHO (2011)                  |
|                                 | Ens.2 | 7,89   | 4,81     | 3,00   | 3,50   | 7,300  | 10,00  | 17,10  |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.3 | 28,50  | 27,06    | 3,50   | 5,10   | 16,30  | 59,10  | 68,80  |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.4 | 27,81  | 24,18    | 3,50   | 6,50   | 17,30  | 52,40  | 65,30  |                                   |                                      |                             |
| <b>Conductividad</b><br>(uS/cm) | Ens.1 | 125,62 | 18,10    | 107,70 | 112,25 | 119,80 | 130,80 | 162,70 | < 1000                            | -                                    | -                           |
|                                 | Ens.2 | 127,31 | 20,53    | 107,10 | 111,70 | 121,40 | 133,15 | 170,00 |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.3 | 208,97 | 95,01    | 107,70 | 123,05 | 158,80 | 305,00 | 357,00 |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.4 | 204,50 | 91,83    | 107,70 | 120,90 | 157,20 | 289,50 | 358,00 |                                   |                                      |                             |
| <b>Temperatura</b><br>(°C)      | Ens.1 | 22,29  | 0,13     | 22,10  | 22,20  | 22,30  | 22,40  | 22,50  | -                                 | Cercana a<br>temperatura<br>ambiente | Pacheco (2004)              |
|                                 | Ens.2 | 22,06  | 0,19     | 21,80  | 21,90  | 22,20  | 22,20  | 22,30  |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.3 | 21,92  | 0,10     | 21,80  | 21,90  | 21,90  | 21,90  | 22,20  |                                   |                                      |                             |
|                                 | Ens.4 | 21,62  | 0,23     | 21,40  | 21,40  | 21,70  | 21,70  | 22,20  |                                   |                                      |                             |

Ens.1: NaOH1%; Ens.2: NaOH 4%; Ens.3: NaHCO<sub>3</sub> 1%; Ens4: NaHCO<sub>3</sub> 4%.

### Anexo 10.7 Cálculo de los ISL para los ensayos de dosificación

| Alcalinizante         | Dosis | ALCALINIDAD<br>D<br>(G-mol/L) | Bicarbonatos*<br>calculado Mol-<br>g/l | Temperatura<br>Kelvin | p[Ca. g-<br>mol/L] | p[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> . G-<br>mol/L] | pALCALINIDAD<br>D<br>(G-mol/L) | Fuerza iónica (I) | E           | Parte para<br>calcular A |
|-----------------------|-------|-------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------|--------------------------|
| Blanco                | 0,0   | 1,26E-04                      | 1,27E-04                               | 295,2                 | 3,80               | 3,90                                           | -                              | 0,0017232         | 79,2974358  | 2,79214E-07              |
| NaOH 1%               | 2,0   | 1,36E-04                      | 1,36E-04                               | 295,3                 | 3,74               | 3,87                                           | -                              | 0,0017584         | 79,26139533 | 2,79262E-07              |
|                       | 4,0   | 1,80E-04                      | 1,80E-04                               | 295,1                 | 3,74               | 3,74                                           | -                              | 0,0018416         | 79,3334938  | 2,79165E-07              |
|                       | 6,0   | 2,20E-04                      | 2,19E-04                               | 295,2                 | 3,74               | 3,66                                           | -                              | 0,0019168         | 79,2974358  | 2,79214E-07              |
|                       | 8,0   | 2,60E-04                      | 2,52E-04                               | 295,2                 | 3,74               | 3,60                                           | -                              | 0,0020096         | 79,2974358  | 2,79214E-07              |
|                       | 10,0  | 3,20E-04                      | 2,92E-04                               | 295,2                 | 3,72               | 3,53                                           | -                              | 0,0020912         | 79,2974358  | 2,79214E-07              |
|                       | 20,0  | 5,60E-04                      | 3,82E-04                               | 295,3                 | 3,71               | 3,42                                           | -                              | 0,0026016         | 79,26139533 | 2,79262E-07              |
| NaOH 4%               | 2,0   | 1,34E-04                      | 1,34E-04                               | 295,3                 | 3,76               | 3,87                                           | -                              | 0,0017136         | 79,26139533 | 2,79262E-07              |
|                       | 4,0   | 2,20E-04                      | 2,20E-04                               | 295,2                 | 3,76               | 3,66                                           | -                              | 0,0018512         | 79,2974358  | 2,79214E-07              |
|                       | 6,0   | 2,80E-04                      | 2,78E-04                               | 295,3                 | 3,75               | 3,56                                           | -                              | 0,0019424         | 79,26139533 | 2,79262E-07              |
|                       | 8,0   | 3,20E-04                      | 3,01E-04                               | 295,2                 | 3,75               | 3,52                                           | -                              | 0,0020432         | 79,2974358  | 2,79214E-07              |
|                       | 10,0  | 3,80E-04                      | 3,39E-04                               | 295,2                 | 3,75               | 3,47                                           | -                              | 0,0021328         | 79,2974358  | 2,79214E-07              |
|                       | 20,0  | 6,20E-04                      | 3,77E-04                               | 295,2                 | 3,69               | 3,42                                           | -                              | 0,00272           | 79,2974358  | 2,79214E-07              |
| NaHCO <sub>3</sub> 1% | 10,0  | 2,20E-04                      | 2,20E-04                               | 294,9                 | 3,73               | 3,66                                           | -                              | 0,0018912         | 79,40566245 | 2,79068E-07              |
|                       | 20,0  | 2,40E-04                      | 2,40E-04                               | 294,9                 | 3,69               | 3,62                                           | -                              | 0,0020576         | 79,40566245 | 2,79068E-07              |
|                       | 50,0  | 5,40E-04                      | 5,40E-04                               | 294,9                 | 3,61               | 3,27                                           | -                              | 0,0025408         | 79,40566245 | 2,79068E-07              |
|                       | 130,0 | 1,40E-03                      | 1,39E-03                               | 294,9                 | 3,61               | 2,86                                           | 2,86                           | 0,003808          | 79,40566245 | 2,79068E-07              |
|                       | 200,0 | 2,07E-03                      | 2,07E-03                               | 294,9                 | 3,60               | 2,68                                           | 2,68                           | 0,004848          | 79,40566245 | 2,79068E-07              |
|                       | 250,0 | 2,68E-03                      | 2,68E-03                               | 295,0                 | 3,57               | 2,57                                           | 2,57                           | 0,00568           | 79,36956934 | 2,79117E-07              |
| NaHCO <sub>3</sub> 4% | 10,0  | 2,04E-04                      | 2,04E-04                               | 294,4                 | 3,71               | 3,69                                           | -                              | 0,001856          | 79,58639181 | 2,78827E-07              |
|                       | 20,0  | 2,40E-04                      | 2,40E-04                               | 294,4                 | 3,71               | 3,62                                           | -                              | 0,0020128         | 79,58639181 | 2,78827E-07              |
|                       | 50,0  | 5,00E-04                      | 5,00E-04                               | 294,4                 | 3,69               | 3,30                                           | -                              | 0,0025152         | 79,58639181 | 2,78827E-07              |
|                       | 130,0 | 1,03E-03                      | 1,03E-03                               | 294,4                 | 3,68               | 2,99                                           | 2,99                           | 0,003792          | 79,58639181 | 2,78827E-07              |
|                       | 200,0 | 1,80E-03                      | 1,80E-03                               | 294,5                 | 3,67               | 2,75                                           | 2,74                           | 0,00456           | 79,55021072 | 2,78875E-07              |
|                       | 250,0 | 2,54E-03                      | 2,53E-03                               | 294,5                 | 3,67               | 2,60                                           | 2,60                           | 0,005728          | 79,55021072 | 2,78875E-07              |

**Continuación Anexo 10.7 Cálculo de los ISL para los ensayos de dosificación**

| ALCALINIZANTE               | A     | pfm    | pKs  | pK2   | pKw   | pHs  | ISL   | INTERPRETACIÓN |
|-----------------------------|-------|--------|------|-------|-------|------|-------|----------------|
| <b>Blanco</b>               | 0,510 | 0,0198 | 8,46 | 10,36 | 14,09 | 9,68 | -3,54 | INSATURADA     |
| <b>NaOH 1%</b>              | 0,510 | 0,0200 | 8,46 | 10,35 | 14,09 | 9,60 | -2,97 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0204 | 8,46 | 10,36 | 14,10 | 9,48 | -2,46 | INSATURADA     |
|                             | 0,510 | 0,0208 | 8,46 | 10,36 | 14,09 | 9,39 | -1,69 | INSATURADA     |
|                             | 0,510 | 0,0213 | 8,46 | 10,36 | 14,09 | 9,34 | -0,57 | INSATURADA     |
|                             | 0,510 | 0,0217 | 8,46 | 10,36 | 14,09 | 9,25 | 0,02  | SOBRESATURADA  |
|                             | 0,510 | 0,0240 | 8,46 | 10,35 | 14,09 | 9,14 | 0,88  | SOBRESATURADA  |
| <b>NaOH 4%</b>              | 0,510 | 0,0197 | 8,46 | 10,35 | 14,09 | 9,62 | -3,29 | INSATURADA     |
|                             | 0,510 | 0,0205 | 8,46 | 10,36 | 14,09 | 9,41 | -2,36 | INSATURADA     |
|                             | 0,510 | 0,0209 | 8,46 | 10,35 | 14,09 | 9,31 | -1,08 | INSATURADA     |
|                             | 0,510 | 0,0214 | 8,46 | 10,36 | 14,09 | 9,27 | -0,18 | INSATURADA     |
|                             | 0,510 | 0,0219 | 8,46 | 10,36 | 14,09 | 9,22 | 0,19  | SOBRESATURADA  |
|                             | 0,510 | 0,0244 | 8,46 | 10,36 | 14,09 | 9,13 | 1,03  | SOBRESATURADA  |
| <b>NaHCO<sub>3</sub> 1%</b> | 0,509 | 0,0207 | 8,46 | 10,36 | 14,10 | 9,39 | -2,78 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0215 | 8,46 | 10,36 | 14,10 | 9,31 | -2,54 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0237 | 8,46 | 10,36 | 14,10 | 8,89 | -1,82 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0285 | 8,46 | 10,36 | 14,10 | 8,50 | -0,99 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0317 | 8,46 | 10,36 | 14,10 | 8,34 | -0,54 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0340 | 8,46 | 10,36 | 14,10 | 8,21 | -0,20 | INSATURADA     |
| <b>NaHCO<sub>3</sub> 4%</b> | 0,509 | 0,0205 | 8,46 | 10,36 | 14,12 | 9,41 | -2,73 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0212 | 8,46 | 10,36 | 14,12 | 9,34 | -2,51 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0235 | 8,46 | 10,36 | 14,12 | 9,01 | -1,85 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0284 | 8,46 | 10,36 | 14,12 | 8,71 | -1,11 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0308 | 8,46 | 10,36 | 14,12 | 8,47 | -0,65 | INSATURADA     |
|                             | 0,509 | 0,0341 | 8,46 | 10,36 | 14,12 | 8,34 | -0,28 | INSATURADA     |

### Anexo 10.8 Prueba t-Student (contrastar concentraciones) para las distintas variables evaluadas

| <b>A. DUREZA TOTAL</b>                                                                                                         |                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Diferencia = $\mu$ (NaOH 1%) - $\mu$ (NaOH 4%)<br>Estimación diferencia: 0,338<br>Valor-T = 0,63<br>Valor-P = 0,535<br>GL = 24 | Diferencia = $\mu$ (NaHCO <sub>3</sub> 1%) - $\mu$ (NaHCO <sub>3</sub> 4%)<br>Estimación diferencia: 2,908<br>Valor-T = 3,13<br>Valor-P = 0,005<br>GL = 24 |
| P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                     | P< $\alpha$ ; Se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                    |
| <b>B. CALCIO</b>                                                                                                               |                                                                                                                                                            |
| Diferencia = $\mu$ (NaOH 1%) - $\mu$ (NaOH 4%)<br>Estimación diferencia: 0,182<br>Valor-T = 1,11<br>Valor-P = 0,279<br>GL = 24 | Diferencia = $\mu$ (NaHCO <sub>3</sub> 1%) - $\mu$ (NaHCO <sub>3</sub> 4%)<br>Estimación diferencia: 0,772<br>Valor-T = 2,04<br>Valor-P = 0,053<br>GL = 24 |
| P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                     | P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                 |
| <b>C. SODIO</b>                                                                                                                |                                                                                                                                                            |
| Diferencia = $\mu$ (NaOH 1%) - $\mu$ (NaOH 4%)<br>Estimación diferencia: -0,01<br>Valor-T = 0,01<br>Valor-P = 0,995<br>GL = 12 | Diferencia = $\mu$ (NaOH 1%) - $\mu$ (NaOH 4%)<br>Estimación diferencia: 0,7<br>Valor-T = 0,05<br>Valor-P = 0,961<br>GL = 12                               |
| P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                     | P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                 |

$\alpha=0,05$ ;  $\mu$ : media; GL: Grados de Libertad

### Anexo 10.9 Prueba Mann-Whitney (contrastar concentraciones) para variables evaluadas

| <b>A. TURBIEDAD</b>                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>NaOH1% vs NaOH4%</p> <p>Punto estimado para MED1-MED2 es -0,5250</p> <p>IC al 95,4 % para MED1-MED2 es (-0,6650;-0,1271)</p> <p>W = 120,0</p> <p>Prueba de MED1 = MED2 vs MED1 no = MED2 es significativo en 0,0048</p> <p>La prueba es significativa en 0,0048</p> | <p>NaHCO31% vs NaHCO34%</p> <p>Punto estimado para MED1-MED2 es -0,0250</p> <p>IC al 95,4 % para MED1-MED2 es (-0,1710;0,1099)</p> <p>W = 158,5</p> <p>Prueba de MED1 = MED2 vs MED1 no = MED2 es significativo en 0,3975</p> <p>La prueba es significativa en 0,3972</p> |
| P< $\alpha$ ; Se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                                                                                                                                | P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>B. pH</b>                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p>NaOH1% vs NaOH4%</p> <p>Punto estimado para MED1-MED2 es -0,130</p> <p>IC al 95,4 % para MED1-MED2 es (-1,541;0,931)</p> <p>W = 167,5</p> <p>Prueba de MED1 = MED2 vs MED1 no = MED2 es significativo en 0,7005</p> <p>La prueba es significativa en 0,7005</p>     | <p>NaHCO31% vs NaHCO34%</p> <p>Punto estimado para MED1-MED2 es -0,0600</p> <p>IC al 95,4 % para MED1-MED2 es (-0,5800;0,4199)</p> <p>W = 166,0</p> <p>Prueba de MED1 = MED2 vs MED1 no = MED2 es significativo en 0,6444</p> <p>La prueba es significativa en 0,6441</p> |
| P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                                                                                                                             | P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>C. ALCALINIDAD TOTAL</b>                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p>NaOH1% vs NaOH4%</p> <p>Punto estimado para MED1-MED2 es -1,00</p> <p>IC al 95,4 % para MED1-MED2 es (-7,00;4,30)</p> <p>W = 167,5</p> <p>Prueba de MED1 = MED2 vs MED1 no = MED2 es significativo en 0,7005</p> <p>La prueba es significativa en 0,7001</p>        | <p>P NaHCO31% vs NaHCO34%</p> <p>Punto estimado para MED1-MED2 es -0,00</p> <p>IC al 95,4 % para MED1-MED2 es (-39,41;37,99)</p> <p>W = 175,5</p> <p>Prueba de MED1 = MED2 vs MED1 no = MED2 es significativo en 1,0000</p> <p>La prueba es significativa en 1,0000</p>   |
| P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                                                                                                                             | P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>D. CONDUCTIVIDAD</b>                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p>NaOH1% vs NaOH4%</p> <p>Punto estimado para MED1-MED2 es -1,50</p> <p>IC al 95,4 % para MED1-MED2 es (-12,59;9,70)</p> <p>W = 169,5</p> <p>Prueba de MED1 = MED2 vs MED1 no = MED2 es significativo en 0,7779</p> <p>La prueba es significativa en 0,7778</p>       | <p>P NaHCO31% vs NaHCO34%</p> <p>Punto estimado para MED1-MED2 es 2,1</p> <p>IC al 95,4 % para MED1-MED2 es (-77,2;80,8)</p> <p>W = 185,5</p> <p>Prueba de MED1 = MED2 vs MED1 no = MED2 es significativo en 0,6261</p> <p>La prueba es significativa en 0,6261</p>       |
| P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                                                                                                                             | P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub>                                                                                                                                                                                                                                |

$\alpha=0,05$ ; MED: Mediana; IC: Intervalo de confian

**Anexo 10.10 ANOVA de un solo factor para las distintas variables evaluadas. Comparación de los ensayos. Dosis de 10 y 20 mg/L**

| A. ALCALINIDAD TOTAL                       |    |       |       |         |       |      | B. DUREZA TOTAL                            |      |       |       |      |       |  |
|--------------------------------------------|----|-------|-------|---------|-------|------|--------------------------------------------|------|-------|-------|------|-------|--|
| Fuente                                     | GL | SC    | MC    | F       | P     |      | Fuente                                     | GL   | SC    | MC    | F    | P     |  |
| Ensayos                                    | 3  | 572,3 | 190,8 | 6,89    | 0,006 |      | Ensayos                                    | 3    | 25,06 | 8,35  | 6,66 | 0,007 |  |
| Error                                      |    | 12    | 332,5 | 27,7    |       |      | Error                                      |      | 12    | 15,06 | 1,25 |       |  |
| Total                                      |    | 15    | 904,8 |         |       |      | Total                                      |      | 15    | 40,12 |      |       |  |
| P< $\alpha$ ; Se rechaza H <sub>0</sub>    |    |       |       |         |       |      | P< $\alpha$ ; Se rechaza H <sub>0</sub>    |      |       |       |      |       |  |
| C. CALCIO                                  |    |       |       |         |       |      | D. SODIO                                   |      |       |       |      |       |  |
| Fuente                                     | GL | SC    | MC    | F       | P     |      | Fuente                                     | GL   | SC    | MC    | F    | P     |  |
| Ensayos                                    | 3  | 0,657 | 0,219 | 1,55    | 0,252 |      | Ensayos                                    | 3    | 63,0  | 21,0  | 1,26 | 0,401 |  |
| Error                                      |    | 12    | 1,691 | 0,141   |       |      | Error                                      |      | 4     | 66,8  | 16,7 |       |  |
| Total                                      |    | 15    | 2,348 |         |       |      | Total                                      |      | 7     | 129,8 |      |       |  |
| P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub> |    |       |       |         |       |      | P> $\alpha$ ; No se rechaza H <sub>0</sub> |      |       |       |      |       |  |
| E. CONDUCTIVIDAD                           |    |       |       |         |       |      |                                            |      |       |       |      |       |  |
|                                            |    |       |       | Fuente  | GL    | SC   | MC                                         | F    | P     |       |      |       |  |
|                                            |    |       |       | Ensayos | 3     | 2925 | 975                                        | 4,68 | 0,022 |       |      |       |  |
|                                            |    |       |       | Error   |       | 12   | 2501                                       | 208  |       |       |      |       |  |
|                                            |    |       |       | Total   |       | 15   | 5426                                       |      |       |       |      |       |  |
| P< $\alpha$ ; Se rechaza H <sub>0</sub>    |    |       |       |         |       |      |                                            |      |       |       |      |       |  |

$\alpha=0,05$ ; GL: Grados de Libertad; SC: Suma de Cuadrados; MC:Media de Cuadrados

**Anexo 10.11 Prueba Kruskal-Wallis para la turbiedad y el pH. Comparación de los Ensayos. Dosis de 10 y 20 mg/L**

| A. TURBIEDAD                            |         |             |      |       | B. pH                                   |         |             |      |       |
|-----------------------------------------|---------|-------------|------|-------|-----------------------------------------|---------|-------------|------|-------|
| Ensayo N                                | Mediana | Rango prom. | Z    |       | Ensayo N                                | Mediana | Rango prom. | Z    |       |
| NaHCO <sub>3</sub> 1%                   | 4       | 0,5400      | 3,0  | -2,67 | NaHCO <sub>3</sub> 1%                   | 4       | 6,690       | 3,5  | -2,43 |
| NaHCO <sub>3</sub> 4%                   | 4       | 0,6360      | 6,0  | -1,21 | NaHCO <sub>3</sub> 4%                   | 4       | 6,755       | 5,5  | -1,46 |
| NaOH 1%                                 | 4       | 0,8715      | 10,8 | 1,09  | NaOH 1%                                 | 4       | 9,645       | 11,5 | 1,46  |
| NaOH 4%                                 | 4       | 1,0150      | 14,3 | 2,79  | NaOH 4%                                 | 4       | 9,775       | 13,5 | 2,43  |
| General                                 | 16      |             | 8,5  |       | General                                 | 16      |             | 8,5  |       |
| H = 13,17                               | DF = 3  | P = 0,004   |      |       | H = 12,05                               | DF = 3  | P = 0,007   |      |       |
| P< $\alpha$ ; Se rechaza H <sub>0</sub> |         |             |      |       | P< $\alpha$ ; Se rechaza H <sub>0</sub> |         |             |      |       |

$\alpha=0,05$

**Anexo 10.12 ANOVA de un solo factor para el ISL y la relación Alcalinidad/Cl<sup>-</sup> + SO<sub>4</sub><sup>=</sup>. Comparación de los Ensayos. Dosis de 10 y 20 mg/L**

| A. ISL                         |    |        |        |       |       | B. Alcalinidad/Cl + SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> |    |        |        |        |       |
|--------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|--------------------------------------------------|----|--------|--------|--------|-------|
| Fuente                         | GL | SC     | MC     | F     |       | Fuente                                           | GL | SC     | MC     | F      | P     |
| Ensayos                        | 3  | 20,069 | 6,690  | 34,38 | 0,003 | Ensayos                                          | 3  | 0,1354 | 0,0451 | 2,91   | 0,164 |
| Error                          |    | 4      | 0,778  | 0,195 |       | Error                                            |    | 4      | 0,0620 | 0,0155 |       |
| Total                          |    | 7      | 20,847 |       |       | Total                                            |    | 7      | 0,1974 |        |       |
| P<α; Se rechaza H <sub>0</sub> |    |        |        |       |       | P>α; No se rechaza H <sub>0</sub>                |    |        |        |        |       |

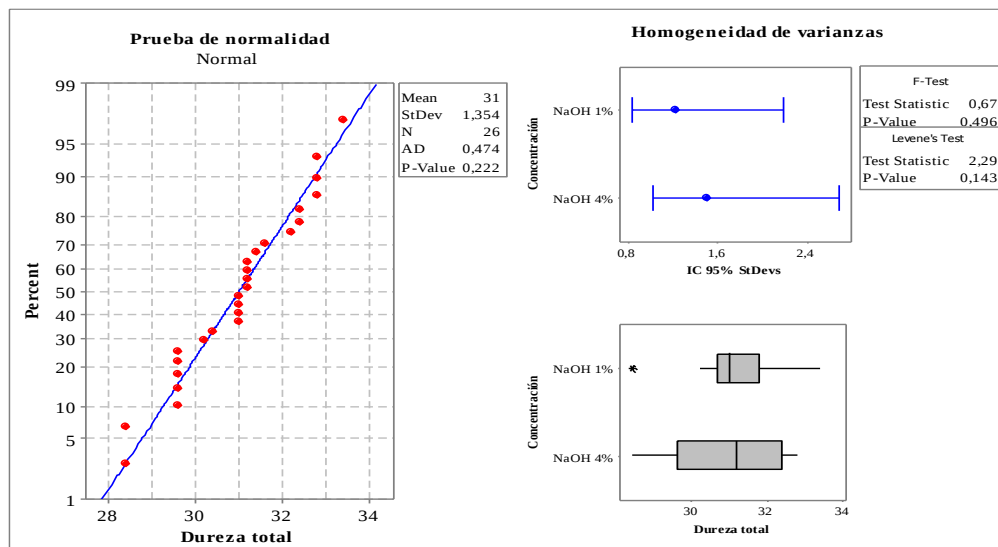
**Anexo 10.13** Tukey al 5% para las variables con diferencias significativas del Anexo 10.10

| <b>A. ALCALINIDAD TOTAL</b> |   |        |          | <b>B. DUREZA TOTAL</b> |   |        |          |
|-----------------------------|---|--------|----------|------------------------|---|--------|----------|
|                             | N | Mean   | Grouping |                        | N | Mean   | Grouping |
| NaOH 4%                     | 4 | 24,500 | A        | NaHCO <sub>3</sub> 1%  | 4 | 35,000 | A        |
| NaOH 1%                     | 4 | 22,750 | A B      | NaHCO <sub>3</sub> 4%  | 4 | 32,350 | B        |
| NaHCO <sub>3</sub> 4%       | 4 | 12,900 | B C      | NaOH 1%                | 4 | 32,150 | B        |
| NaHCO <sub>3</sub> 1%       | 4 | 10,750 | C        | NaOH 4%                | 4 | 31,900 | B        |
| <b>C. CONDUCTIVIDAD</b>     |   |        |          |                        |   |        |          |
|                             | N | Mean   | Grouping |                        | N | Mean   | Grouping |
| NaOH 4%                     | 4 | 151,00 | A        |                        |   |        |          |
| NaOH 1%                     | 4 | 146,72 | A        |                        |   |        |          |
| NaHCO <sub>3</sub> 1%       | 4 | 123,15 | B        |                        |   |        |          |
| NaHCO <sub>3</sub> 4%       | 4 | 120,93 | B        |                        |   |        |          |

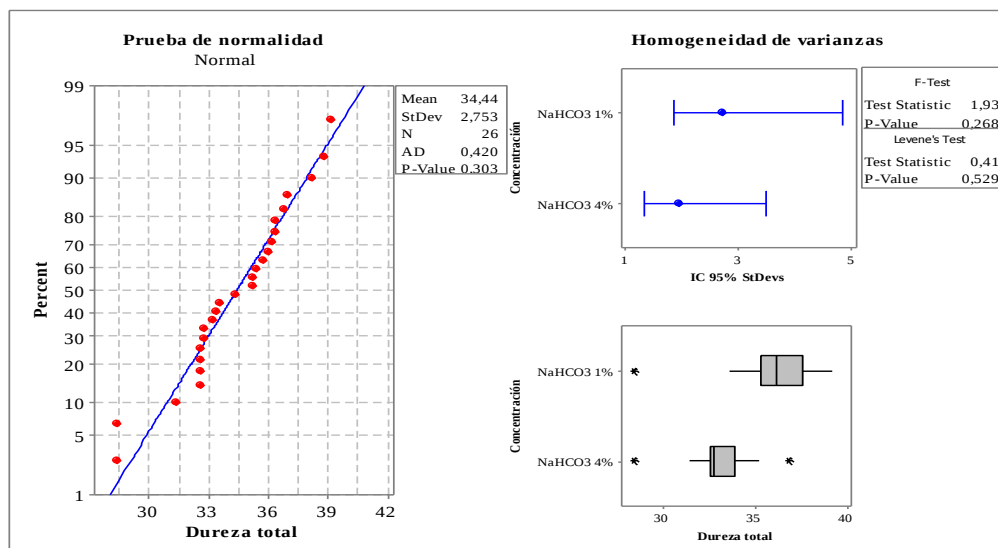
**Anexo 10.14** Tukey al 5% para el ISL

| <b>ISL</b>            |   |         |          |
|-----------------------|---|---------|----------|
|                       | N | Mean    | Grouping |
| NaOH 4%               | 2 | 0,6068  | A        |
| NaOH 1%               | 2 | 0,4500  | A        |
| NaHCO <sub>3</sub> 4% | 2 | -2,6169 | B        |
| NaHCO <sub>3</sub> 1% | 2 | -2,6575 | B        |

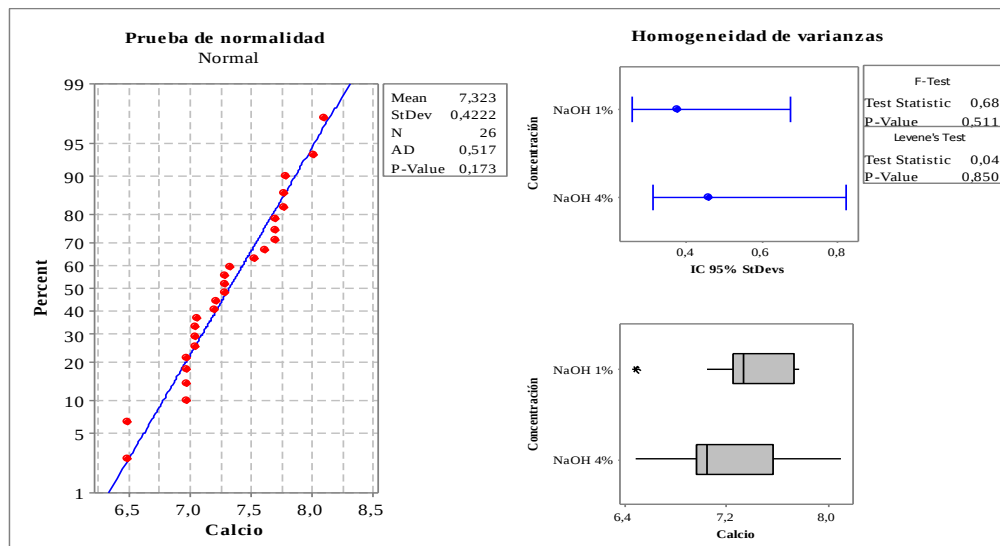
## Anexo 10.15 Validación de supuestos para las pruebas t-Student realizadas



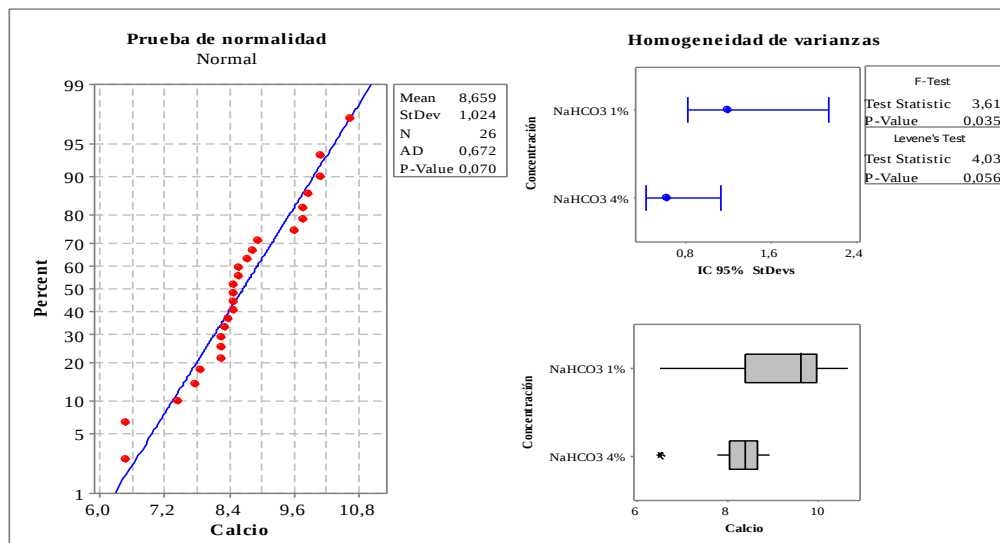
**Figura 10.1** Resultados de normalidad y homogeneidad de varianzas para la dureza total (Concentraciones de NaOH)



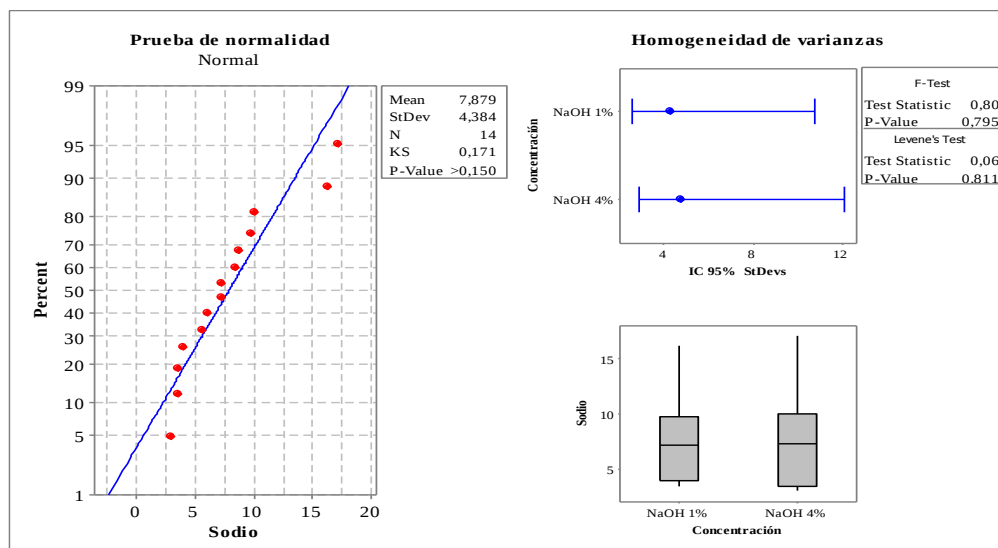
**Figura 10.2** Resultados de normalidad y homogeneidad de varianzas para la dureza total (Concentraciones de NaHCO<sub>3</sub>)



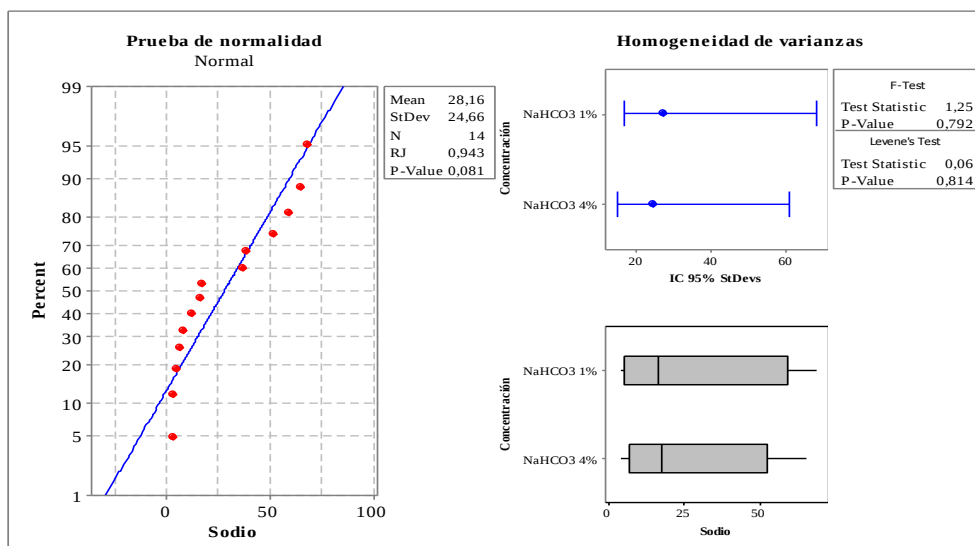
**Figura 10.3** Resultados de normalidad y homogeneidad de varianzas para el calcio (Concentraciones de NaOH)



**Figura 10.4** Resultados de normalidad y homogeneidad de varianzas para el calcio (Concentraciones de NaHCO<sub>3</sub>)

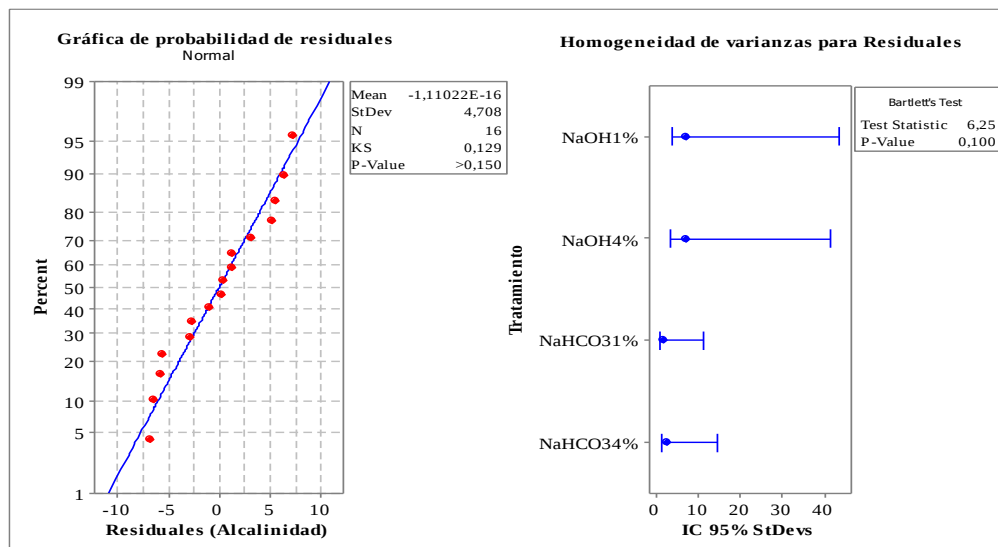


**Figura 10.5** Resultados de normalidad y homogeneidad de varianzas para Sodio (Concentraciones de NaOH)

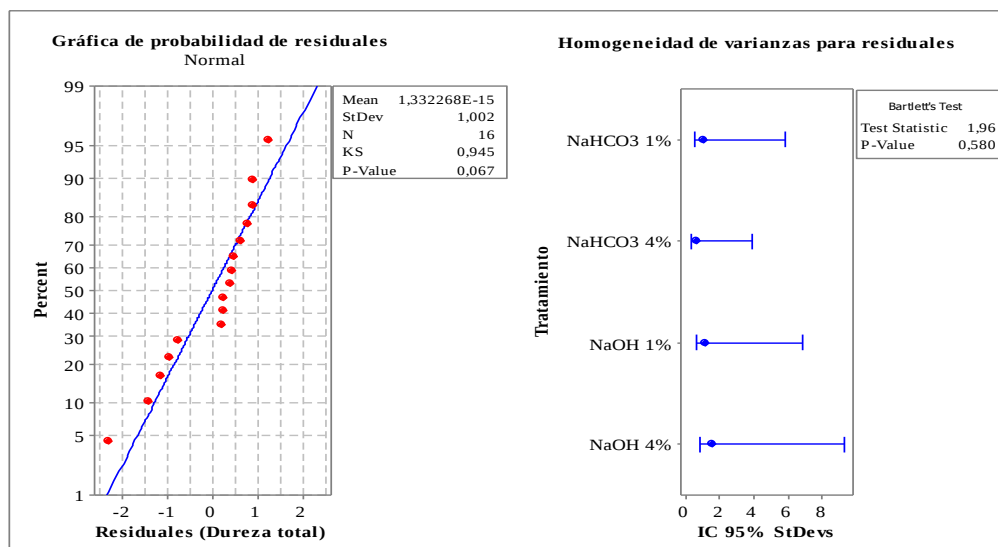


**Figura 10.6** Resultados de normalidad y homogeneidad de varianzas para Sodio (Concentraciones de NaHCO<sub>3</sub>)

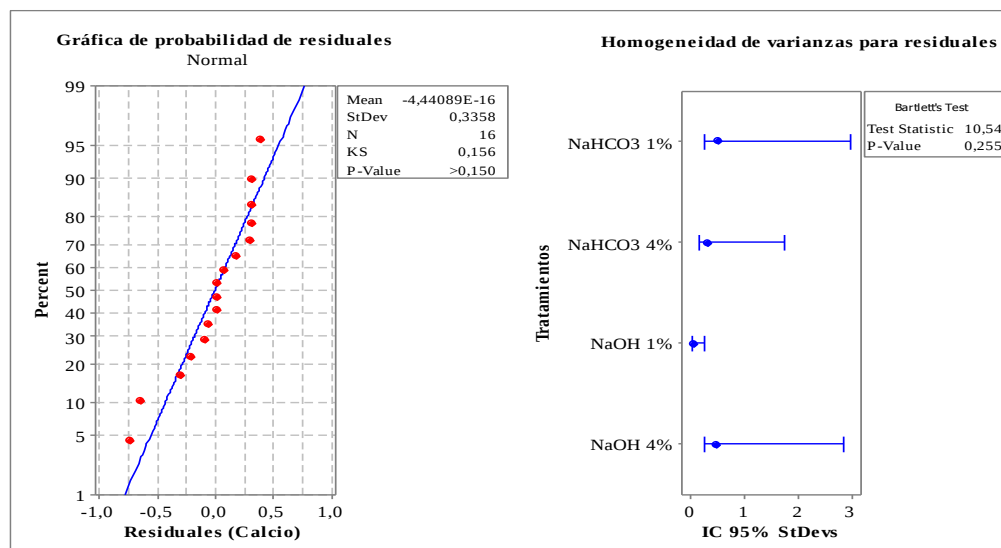
## Anexo 10.16 Validación de supuestos para los ANOVA realizados



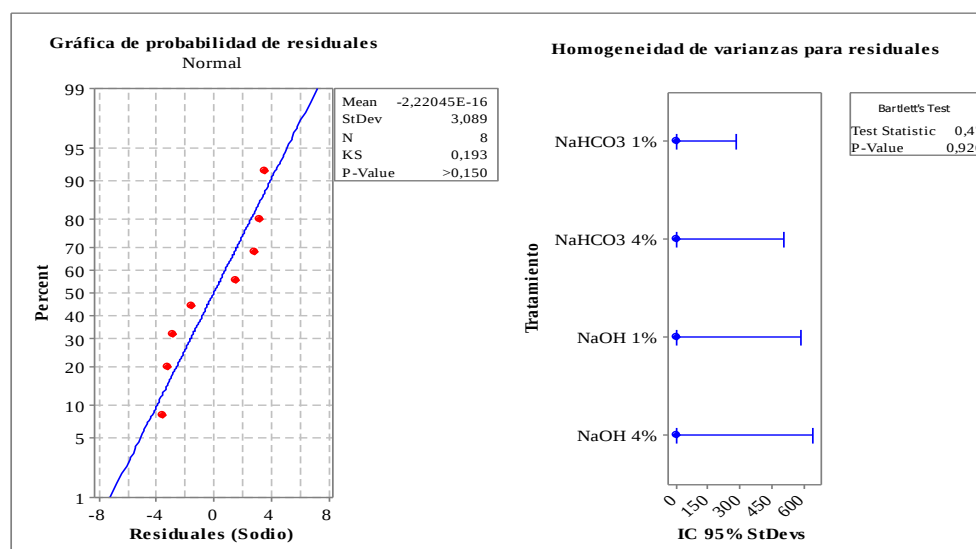
**Figura 10.7** Normalidad y homogeneidad de varianzas para alcalinidad (Ensayos: dosis de 10 y 20 mg/L)



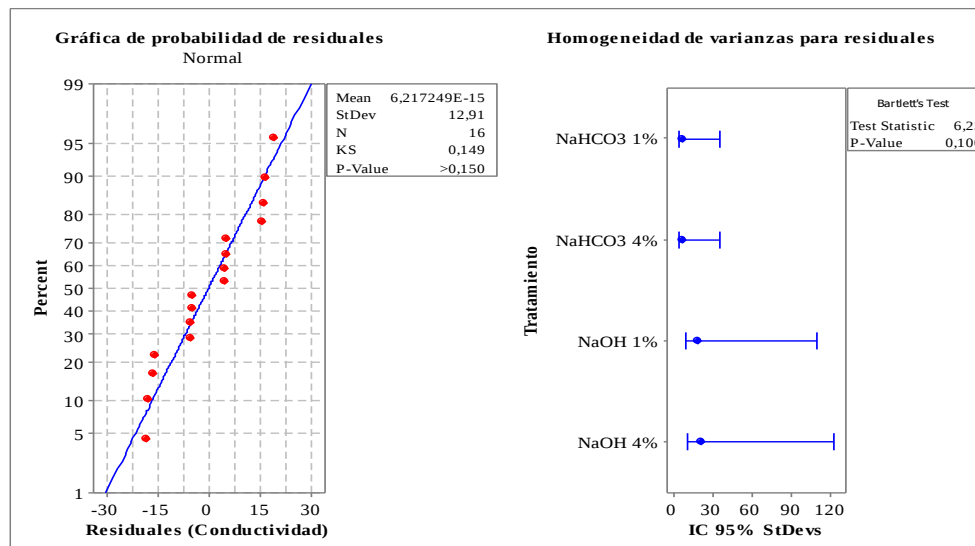
**Figura 10.8** Normalidad y homogeneidad de varianzas para dureza total (Ensayos: dosis de 10 y 20 mg/L)



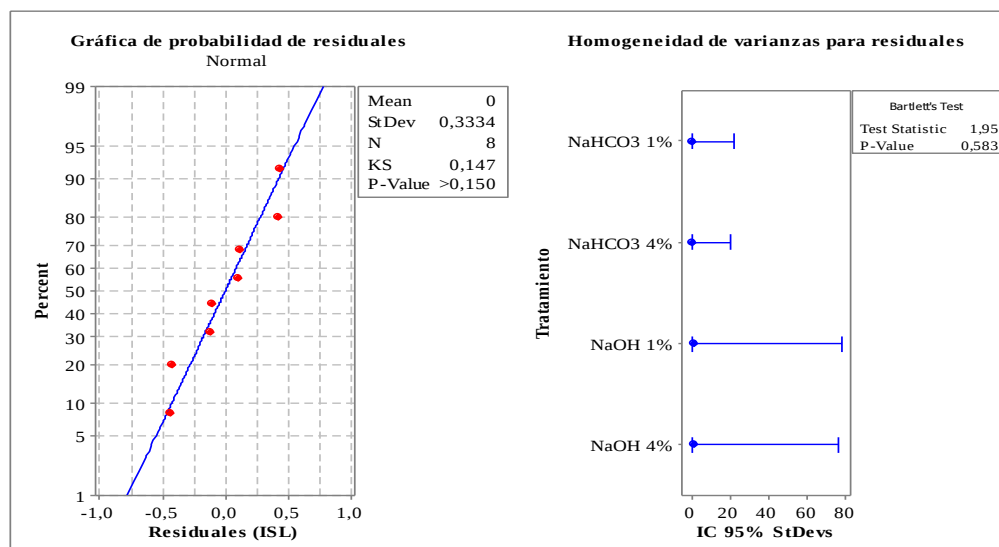
**Figura 10.9** Normalidad y homogeneidad de varianzas para calcio (Ensayos: dosis de 10 y 20 mg/L)



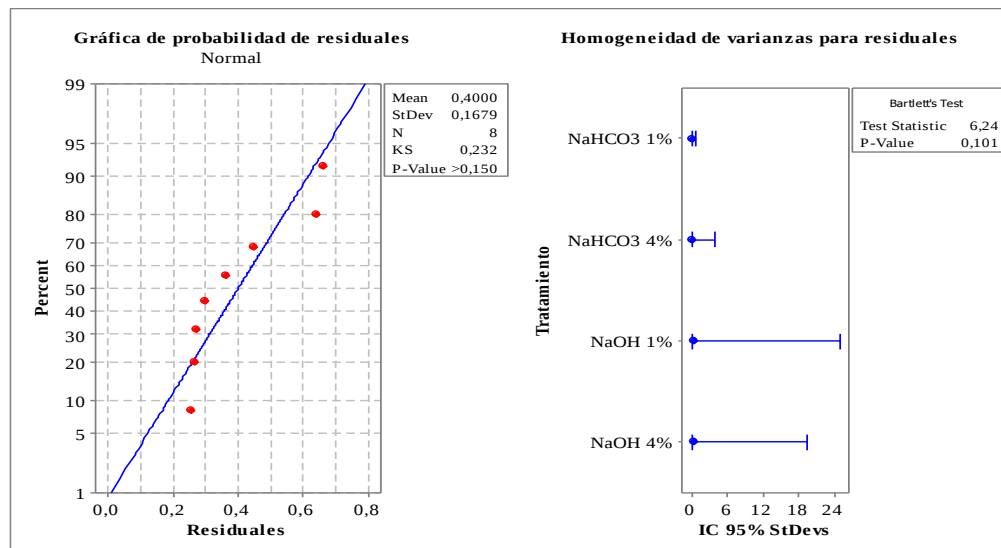
**Figura 10.10** Normalidad y homogeneidad de varianzas para Sodio (Ensayos: dosis de 10 y 20 mg/L)



**Figura 10.11** Normalidad y homogeneidad de varianzas para Conductividad (Ensayos: dosis de 10 y 20 mg/L)



**Figura 10.12** Normalidad y homogeneidad de varianzas para el ISL (Ensayos: dosis de 10 y 20 mg/L)



**Figura 10.13** Normalidad y homogeneidad de varianzas para alcalinidad/ $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$  (Ensayos: dosis de 10 y 20 mg/L)