

Evaluación del carácter corrosivo del agua y su impacto en un sistema de enfriamiento industrial

Evaluation of the corrosive nature of water and its impact on an industrial cooling system

Zulennys Marcano-Marín^A y José Castro-Soto^B

Resumen— La calidad del agua es un factor crítico para la eficiencia y vida útil de los sistemas de enfriamiento industrial, pudiendo generar fallas operativas. La investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad del agua de alimentación del sistema de enfriamiento cerrado en Briquetera del Caroní (BRIQCAR), ante la observación de un deterioro y aumento de fugas. El estudio de tipo descriptivo a través de la determinación de parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación, el cálculo del Índice de Saturación de Langelier (ISL) y el análisis de la tendencia del pH e ISL a lo largo del periodo 2010-2025 mediante regresión lineal. Los resultados revelaron una tendencia estadísticamente significativa de disminución en el pH, la alcalinidad total y la dureza cálcica del agua a lo largo de los años. Los valores de pH pasaron de alcalinos a consistentemente ácidos (<5,5). El ISL calculado fue negativo, acentuando una tendencia corrosiva creciente. El análisis de la matriz de correlación confirma que el descenso del pH, la alcalinidad total y la dureza cálcica están interrelacionados directamente a la disminución del pH, lo cual es el impulsor del aumento del potencial corrosivo. Se concluye que la calidad del agua de alimentación ha evolucionado hacia una mayor agresividad química, contribuyendo al deterioro de los equipos y al incremento de fugas. Se recomienda un monitoreo continuo y la implementación de un programa de tratamiento químico correctivo para estabilizar el ISL, protegiendo la infraestructura y optimizando la eficiencia operativa.

Palabras clave: agua, análisis, corrosivo, impacto, industrial.

Abstract— Water quality is a critical factor for the efficiency and lifespan of industrial cooling systems, potentially leading to operational failures. The objective of this study was to evaluate the quality of the feedwater to the closed cooling system at Briquetera del Caroní (BRIQCAR), given the observation of deterioration and increased leaks. The descriptive study determined the physicochemical parameters of the feedwater, calculated the Langelier Saturation Index (LSI), and analyzed the pH and LSI trends over the period 2010–2025 using linear regression. The results revealed a statistically significant downward trend in the pH, total alkalinity, and calcium hardness of the water over the years. pH values shifted from alkaline to consistently acidic (<5.5). The calculated LSI was negative, accentuating an increasing corrosive tendency. Correlation matrix analysis confirms that the decrease in pH, total alkalinity, and calcium hardness are directly interrelated with the decrease in pH, which is the driving force behind the increase in corrosive potential. It is concluded that feedwater quality has evolved toward greater chemical aggressiveness, contributing to equipment deterioration and increased leaks. Continuous monitoring and the implementation of a corrective chemical treatment program are recommended to stabilize the LSI, protecting the infrastructure, and optimizing operational efficiency.

Keywords: water, analysis, corrosive, impact, industrial

1 INTRODUCCIÓN

El agua se considera un recurso insustituible e indispensable para la vida, el bienestar humano y el progreso social y económico de la Nación [1]. En este sentido, el agua representa un recurso esencial para el desarrollo sostenible de la nación venezolana. Sin embargo, uno de los principales problemas que se presentan en las instalaciones hidráulicas es la corrosión en los materiales metálicos, produciéndose perforaciones y obstrucciones de las líneas de agua [2].

Estos fenómenos están relacionados con las características fisicoquímicas del agua, así como con material con el cual entra en contacto, ya que las interacciones entre los materiales de la tubería y el agua pueden causar corrosión [3]. El control de la corrosión es un aspecto importante del suministro de agua potable segura. Los efectos de la corrosión, que pueden no ser evidentes sin monitoreo, son un problema importante que afecta tanto a la salud pública como a los aspectos económicos [4].

En Briquetera del Caroní (BRIQCAR) se cuenta con dos sistemas de enfriamiento, el primero se trata de un sistema de enfriamiento abierto (torres de enfriamiento) (ver Fig. 1a)

Tenga en cuenta que en la primera entrega no debe figurar: nombres de autores, mails, filiaciones y ORCID.

Autores:

A. **ORCID iD** <https://orcid.org/0009-0001-4823-803X>

Zulennys Marcano-Marín, está en CVG Briquetera del Caroní (BRIQCAR), Puerto Ordaz, Venezuela
zulennysmarcano80@gmail.com

B. **ORCID iD** <https://orcid.org/0009-0009-5786-4743>

José Castro-Soto, está en el Centro de Estudios en Química, Universidad Politécnica Territorial del Estado Bolívar, Ciudad Bolívar, Venezuela, CO 8001.
jilcastros78@gmail.com

y el segundo un sistema de enfriamiento cerrado (*Chillers*) (ver Fig. 1b). Estos sistemas son esenciales para la disipación del calor generado en procesos productivos y requieren de un suministro de agua con características fisicoquímicas controladas para prevenir el deterioro de los equipos. El agua de enfriamiento en ambos casos es utilizada para extraer el calor generado por las operaciones de planta [5]. Los equipos EVAPCO constan de serpentines fabricados en acero galvanizado con un diámetro de 25 mm y espesor de pared 1,5 mm, con una capacidad de $125\text{m}^3\text{h}^{-1}$, en los cuales se deben manejar temperaturas de entrada en 52°C y de salida 30°C (ver Fig. 1c).

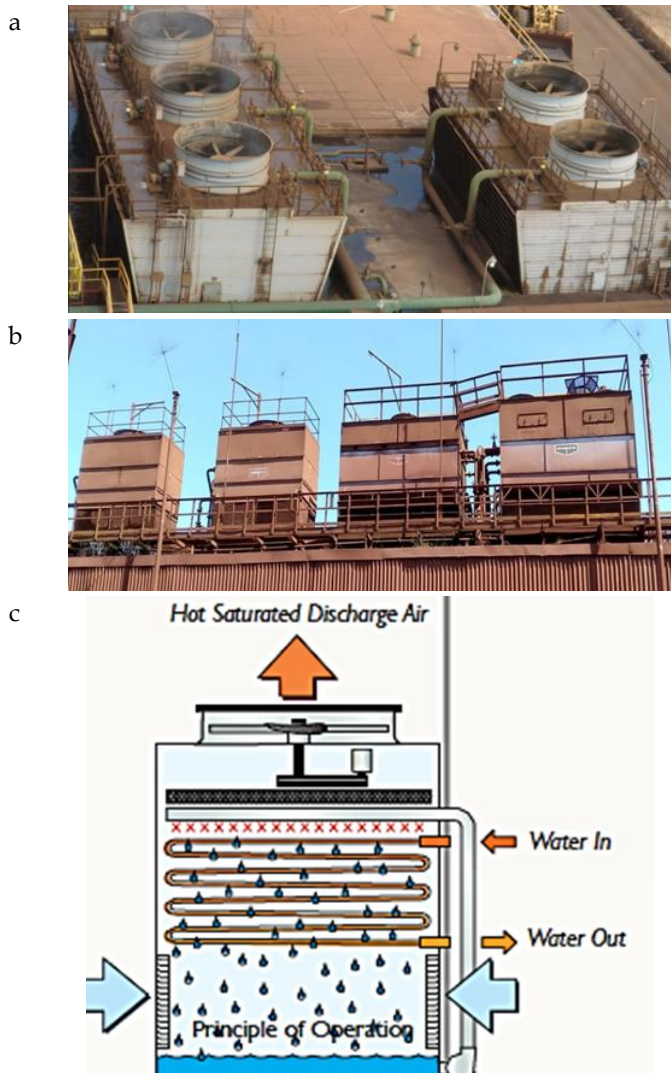


Fig. 1. a) Sistema de enfriamiento abierto (torres de enfriamiento), b) Sistema de enfriamiento cerrado (*Chillers*) y c). Principio de funcionamiento del equipo EVAPCO [5].

Estos equipos hacen circular el fluido de proceso a través de la bobina del enfriador de circuito cerrado. El calor del fluido de proceso se disipa a través de los tubos de la batería a la cascada de agua hacia abajo sobre los tubos. Al mismo tiempo, el aire es aspirado a través de la entrada de aire rejillas de ventilación en la base del refrigerador y se despla-

za hacia arriba sobre la bobina opuesta a la del flujo de agua. Una pequeña parte del agua se evapora que elimina el calor. El aire caliente y húmedo es descargado a la atmósfera. El agua restante cae al colector de agua en la parte inferior del refrigerador donde se recircula por la bomba a través del sistema de distribución de agua y dé marcha atrás en las bobinas [5].

Los sistemas de distribución pueden afectar la calidad del agua potable debido a las condiciones de la tubería y a la operación del sistema. Algunos parámetros son sensibles a la variación durante la distribución como: el cloro residual, pH, color y turbiedad, debido a que el material de la tubería puede presentar deterioro en estos sistemas a causa de la corrosividad del agua [6]. El agua de alimentación utilizada para el sistema de enfriamiento (circuito externo) proviene directamente de la empresa potabilizadora estatal. Se ha observado una alteración en la calidad del agua de alimentación, registros históricos sugieren una tendencia al deterioro de parámetros fisicoquímicos esenciales, lo que podría estar relacionado con el reporte de fugas y la disminución en la eficiencia de los equipos. En consecuencia, la vida útil de los equipos de enfriamiento se ve significativamente afectada por la calidad del agua de alimentación. De acuerdo con las especificaciones de EVAPCO el pH del agua en estos sistemas debería mantenerse dentro del rango de pH de 7,0 a 8,8 [5]. En BRIQCAR, se ha evidenciado corrosión en los equipos, lo que ha provocado fugas de agua y potencialmente un deterioro de la infraestructura (ver Fig. 2).



Fig. 2. Corrosión de tubos serpentines: a) serpentín, b) Corte transversal tubos.

El Índice de Saturación de Langelier (ISL) permite medir la estabilidad de la alcalinidad del agua y predecir su potencial corrosivo o incrustante [7]. Este índice indica si ésta tiene tendencia a disolver o a precipitar el carbonato de calcio (CaCO_3). Optimizar el ISL en el agua industrial es fundamental no solo para asegurar la calidad y evitar daños en tuberías y equipos, sino también para prolongar la vida útil de las instalaciones relacionadas con el agua [8].

En este sentido, la investigación se ve justificada al evaluar la calidad del agua de alimentación del sistema de enfriamiento cerrado en BRIQCAR, lo que es fundamental para comprender el impacto en la integridad de los equipos. Como hipótesis de la investigación, se planteó que la calidad del agua de alimentación ha experimentado una tendencia hacia condiciones corrosivas a lo largo del tiempo, lo que ha contribuido al posible deterioro de los equipos y al aumento de fangos en el sistema de enfriamiento cerrado.

La investigación corresponde al tipo: de campo, exploratorio y descriptivo [9], ya que buscó determinar los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de los sistemas de enfriamiento cerrado. Adicionalmente, presenta un componente de análisis de tendencias, al evaluar el comportamiento del pH y el ISL a lo largo del tiempo, con el fin de comprender la evolución de la calidad del agua suministrada al sistema de enfriamiento cerrado.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA

2.1.1 DATOS HISTÓRICOS (2010-2025)

Se obtuvieron registros semanales de los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación al sistema de enfriamiento cerrado, abarcando el período desde el año 2010 hasta el 2024. La recopilación de la información se realizó a partir de un análisis de datos históricos proporcionados por la Gerencia de Control de Calidad, Superintendencia de Laboratorio de Briquetera del Caroní (BRIQCAR, C.A.). Estos datos que incluían mediciones de pH, alcalinidad total, dureza cálcica, sólidos totales disueltos y temperatura, fueron procesados y organizados para su análisis. Utilizando una hoja de cálculo Microsoft Excel, se calcularon los valores promedio anuales para cada parámetro, lo que permitió consolidar la información y facilitar la evaluación del Índice de Saturación de Langelier (ISL).

2.1.2 DATOS 2025 [10], [11]

La muestra fue recolectada en la entrada de planta, antes de ingresar al equipo evaporativo EVAPCO, en envases de polietileno de 500 mL. Se realizó un muestreo semanal de

tipo aleatorio simple durante dos meses (desde enero hasta abril). Para la captación se abrió la línea de toma muestra ubicada en el área de entrada de los equipos de enfriamiento y se dejó drenar durante unos minutos, se curó el envase en tres ocasiones y se procedió a llenar el envase hasta el tope (ver Fig. 3), seguidamente se trasladó la muestra al laboratorio para su posterior análisis.



Fig. 3. Recolección de muestra de agua de alimentación en el punto de toma de muestra: entrada de planta.

2.2 DETERMINACIÓN DEL PH

2.2.1 CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO [12]

Se encendió el equipo potenciómetro (Metrohm, 781 pH/Ion Meter) y se dejó estabilizar durante 15 minutos. Seguidamente se lavó el electrodo con agua destilada y se secó suavemente con una toalla de papel absorbente. Se tomaron tres vasos de precipitado de 100 mL y se rotularon con la denominación de cada disolución tampón, se añadió 70 mL de cada disolución, respectivamente. Se introdujo el electrodo en la disolución tampón pH 4,00 se dejó estabilizar la lectura en el equipo, se enjuagó el electrodo con agua destilada y con papel absorbente, el procedimiento se repitió con las otras disoluciones tampón.

2.2.2 LECTURA DE LA MUESTRA [13]

Se dejó aclimatar la muestra temperatura ambiente. Se agitó suavemente el envase con la muestra evitando generar burbujas. Se tomó un vaso de precipitado de 100 mL, se añadieron 70 mL de muestra. Se lavó el electrodo con agua destilada y se secó suavemente con una toalla de papel absorbente. Se introdujo el electrodo y se dejó estabilizar el instrumento y se registró la lectura del instrumento.

2.3 DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD

2.3.1 CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO [14], [15]

La calibración del instrumento se realizó mediante el método de corrección por flotación. En un vaso de precipitado de 500 mL se añadió 400 mL de agua destilada y se dejó equilibrar a temperatura ambiente, se registró la temperatu-

ra para encontrar la densidad del agua. Se cargó con agua destilada el titulador automático (Metrohm, 775 Dosimat) y se dejó reposar durante unos minutos para comprobar que no haya fugas.

Por otro lado, en una balanza analítica (Mettler Toledo, AG204) se determinó la masa de un matraz Erlenmeyer de 125 mL con su tapón, el matraz se manipuló con una tira de papel evitando el contacto del conjunto (matraz + tapón) con los dedos para no variar su masa por la grasa que puedan dejar los dedos. Se colocó el matraz en el titulador, con mucho cuidado se retiró el tapón y se dejó fluir el líquido hacia el matraz hasta alcanzar el primer intervalo del volumen nominal, evitando salpicar y/o humedecer el cuello del matraz. Se tapó rápidamente el matraz y se registró el volumen vertido. Seguidamente se determinó la masa del conjunto (matraz + H₂O + tapón).

Se retiró el conjunto de la balanza y se llevó al titulador retirando el tapón justo antes de añadir desde el titulador de 10 a 20 mL y medir la masa vertida. Repetir el procedimiento para 30, 40 y 50 mL. En el procedimiento se realizaron adiciones sucesivas en el mismo matraz. Una vez terminada la recolección de datos, se calculó la masa del agua vertida (W_2) mediante la diferencia entre esta masa (m_2) y la masa del matraz vacío (m_1) (ver Ecuación 1).

$$W_2 = m_2 - m_1 \quad (1)$$

Dónde: W_2 : Masa del agua vertida.
 m_2 : Masa del conjunto Matraz+Agua+Tapón.
 m_1 : Masa del conjunto Matraz+Tapón.

Seguidamente, se realizó la corrección por flotación de la masa (masa corregida del objeto), es decir, el peso en el vacío en gramos (W_1) (ver Ecuación 2).

$$W_1 = W_2 + W_2 \left(\frac{d_{aire}}{d_{obj}} - \frac{d_{aire}}{d_{Masas}} \right) \quad (2)$$

Dónde: W_1 : Masa corregida del objeto.
 W_2 : Masa del agua vertida.
 d_{aire} : Densidad del aire desplazado por las masas y el objeto (0,0012 g/cm³).
 d_{obj} : Densidad del objeto (agua destilada a la temperatura del experimento).
 d_{Masas} : Densidad de la masa de referencia (8,0 g/cm³).

Una vez obtenida la masa del agua vertida (W_2) y el peso en el vacío en gramos (W_1), se calculó el volumen real (V_{real}) vertido por la bureta (ver Ecuación 3).

$$V_{real} = \frac{W_1}{d_{H_2O}} \quad (3)$$

Dónde: V_{real} : Volumen real vertido.
 W_1 : Masa corregida del objeto (g).
 d_{H_2O} : Densidad del agua destilada a la temperatura del experimento.

Seguidamente, se calculó el factor de corrección (FC) (ver Ecuación 4).

$$FC = V_{Real} - V_{Vertido} \quad (4)$$

Dónde: FC: Factor de corrección.
 V_{Real} : Volumen real vertido desde el titulador.
 $V_{Vertido}$: Volumen vertido por el titulador.

Finalmente, se graficó el volumen real (V_{Real}) o corregido que debe aplicarse como una función del volumen vertido ($V_{Vertido}$) obteniéndose el valor del factor de correlación (R^2).

2.3.2 ESTANDARIZACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH)

Se secó una porción de 10 g de biftalato ácido de potasio (KHC₈H₄O₄) en una estufa (Felisa, FE-292D) a 105°C durante una hora, transcurrido este tiempo se llevó a un desecador y se dejó enfriar a temperatura ambiente. En una balanza analítica (Mettler Toledo, AG204) se pesó 0,010 g de KHC₈H₄O₄ y se transfirió un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se disolvió en 100 mL de agua destilada. Luego, se agregó unas gotas de fenolftaleína (0,5%) y empleando un titulador automático (Metrohm, 775 Dosimat) se tituló con el hidróxido de sodio (NaOH) al 0,01 N hasta el viraje de incoloro a rosa pálido. Finalmente se registró el volumen gastado y se calculó la concentración del NaOH (ver Ecuación 5).

$$N_{NaOH} = \frac{m_{Biftalato\ de\ potasio}}{PE_{Biftalato\ de\ potasio} \times V_{NaOH}} \quad (5)$$

Dónde: N_{NaOH} : Normalidad del NaOH.
 m_{KHP} : Masa del KHC₈H₄O₄ (mg).
 PE_{KHP} : Peso equivalente del KHC₈H₄O₄ (204,2).
 V_{NaOH} : Volumen del NaOH gastado (mL).

2.3.3 ESTANDARIZACIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO (H₂SO₄)

Se midió 10 mL de la solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 0,01 N y se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 50 mL, seguidamente se agregó unas gotas de fenolftaleína (0,5%) y empleando el titulador automático (Metrohm, 775 Dosimat) se tituló con hidróxido de sodio (NaOH) al 0,01 N estandarizado, hasta el viraje de incoloro a rosa pálido. Se tomó nota del volumen gastado de NaOH y se calculó la normalidad del H₂SO₄ (ver Ecuación 6).

$$N_1 = \frac{N_2 \times V_2}{V_1} \quad (6)$$

Dónde: N_1 : Normalidad del ácido H_2SO_4 .
 N_2 : Normalidad $NaOH$.
 V_1 : Volumen medido de H_2SO_4 (10 mL).
 V_2 : Volumen gastado de $NaOH$ (mL).

2.3.4 FACTOR DEL H_2SO_4

$$F = \frac{N_{H_2SO_4} \times PE_{CaCO_3} \times 1000}{V_{CaCO_3}} \quad (7)$$

Dónde: F : Factor del H_2SO_4 .
 $N_{H_2SO_4}$: Normalidad del H_2SO_4 .
 PE_{CaCO_3} : Peso equivalente del $CaCO_3$ (50,045).
 $V_{solución}$: Volumen de $CaCO_3$ (50 mL).

2.3.5 ANÁLISIS DE LA MUESTRA [16]

Se dejó aclimatar la muestra temperatura ambiente. Se agitó suavemente el envase con la muestra evitando generar burbujas. Se midió 50 mL de muestra filtrada con un filtro de membrana esterilizado (47 mm de diámetro y 0,45 μm), se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se añadió unas gotas de fenoltaleína (0,5%), si la muestra se torna de color rosa, se introdujo un agitador magnético y se llevó a una plancha de agitación (Metrohm, 728 Stirrer) y empleando un titulador automático (Metrohm, 775 Dosimat) se tituló con H_2SO_4 normalizado, manteniendo agitación constante hasta un viraje a incoloro, se tomó el volumen gastado del H_2SO_4 (V_1). Seguidamente, se calculó la alcalinidad parcial (ver Ecuación 8) y se prosigue sin enrasar la bureta.

Alcalinidad Parcial

$$Ap \text{ (ppm de } CaCO_3) = V_1 \times F \quad (8)$$

Dónde: Ap : Alcalinidad parcial (ppm de $CaCO_3$).
 V_1 : Volumen gastado de H_2SO_4 en la determinación de Ap (mL).
 F : Factor del H_2SO_4 .

Sin embargo, si la muestra no se torna de color rosa, se agregó unas gotas del indicador mixto, si se torna de color azul, se tituló hasta el viraje a rosa salmón, se procedió a tomar el volumen gastado de H_2SO_4 (V_2). Seguidamente, se calculó la alcalinidad total (ver Ecuación 9).

Alcalinidad Total

$$At \text{ (ppm de } CaCO_3) = V_2 \times F \quad (9)$$

Dónde: At : Alcalinidad total (ppm de $CaCO_3$).
 V_2 : Volumen total gastado de H_2SO_4 en la determinación de At (mL).
 F : Factor del H_2SO_4 .

2.4 DETERMINACIÓN DE LA DUREZA CÁLCICA

2.4.1 ESTANDARIZACIÓN DEL EDTA

Se secó 10 g de carbonato de calcio ($CaCO_3$) en una estufa (Felisa, FE-292D) a 105°C durante una hora, transcurrido este tiempo se llevó a un desecador y se dejó enfriar a temperatura ambiente. En una balanza analítica (Mettler Toledo, AG204) se pesó entre 0,010 y 0,020 g de $CaCO_3$ seco. Luego se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se añadió 50 mL de agua destilada caliente y HCl (1:1) gota a gota hasta disolver el $CaCO_3$. Luego se calentó a ebullición por varios minutos para eliminar el dióxido de carbono (CO_2) y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Se agregó una pequeña cantidad de Negro de Eriocromo T (NET) y se ajustó a pH 10. Seguidamente, empleando un titulador automático (Metrohm, 775 Dosimat) se tituló con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) hasta un viraje de color violeta intenso a azul. Finalmente, se registró el volumen de titulante gastado y se calculó la normalidad del titulante (ver Ecuación 10).

$$N_{EDTA} = \frac{m_{CaCO_3}}{V_{EDTA} \times 0,05} \quad (10)$$

Dónde: N_{EDTA} : Normalidad del EDTA.
 m_{CaCO_3} : Masa de $CaCO_3$ (g).
 V_{EDTA} : Volumen del titulante gastado (mL).

2.4.2 FACTOR DEL EDTA

$$F = \frac{N_{EDTA} \times PE_{CaCO_3} \times 1000}{V_{muestra}} \quad (11)$$

Dónde: F : Factor del EDTA.
 N_{EDTA} : Normalidad del EDTA.
 PE_{CaCO_3} : Peso equivalente del $CaCO_3$ (50,04g·mol⁻¹).
 $V_{muestra}$: Volumen de muestra (mL).

2.4.3 ANÁLISIS DE LA MUESTRA [17]

Se dejó aclimatar la muestra temperatura ambiente. Se agitó suavemente el envase con la muestra evitando generar burbujas. Se midió 50 mL de la muestra y se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se introdujo un agitador magnético y se llevó a una plancha de agitación (Metrohm, 728 Stirrer). Seguidamente, se ajustó a pH 12-13, agregando unas gotas de hidróxido de amonio (NH_4OH) en proporción 1:1. Una vez ajustado el pH, se añadió 0,1 g de murexida y empleando el titulador automático (Metrohm, 775 Dosimat) se tituló la muestra con EDTA hasta el viraje del color azul a fucsia. Finalmente, se registró el volumen gastado y se calculó la dureza cálcica del titulante (ver Ecuación 12).

$$D_{Ca} \text{ (ppm } CaCO_3) = V \times F \quad (12)$$

Dónde: D_{Ca} : Dureza cálcica (ppm de $CaCO_3$).
 V : Volumen gastado de EDTA (mL).
 F : Factor del EDTA.

D : $\log_{10} [A_{Total} (mg/L CaCO_3)]$

2.5 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS) [18]

Se lavó una cápsula de porcelana y se secó en estufa (FELISA, FE-292D) a $108^\circ C$ por dos horas, posteriormente se dejó enfriar en un desecador por 30 minutos, una vez frío se pesó en balanza analítica (Mettler Toledo, AG204), este ciclo se repitió hasta peso constante. Una vez alcanzado el peso constante en la capsula de porcelana, con una pipeta volumétrica se tomó 100 mL de muestra y procedió a filtrar la muestra al vacío con un filtro de membrana esterilizado (47 mm de diámetro y $0,45 \mu m$). Se recolectó el filtrado en la cápsula de porcelana (tarada) y se llevó a la estufa de sacado a $108^\circ C$ durante seis horas, se dejó enfriar en un desecador y luego se determinó su masa. Finalmente, se calculó los TDS (ver Ecuación 13).

$$TDS \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A + B) \times 1000}{C} \quad (13)$$

Dónde: TDS: Sólidos disueltos totales ($mg \cdot L^{-1}$).
 A : Peso de la cápsula de porcelana más residuo seco (mg).
 B : Peso de la cápsula de porcelana vacía (mg).
 C : Volumen de filtrado de muestra (mL).

2.6 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SATURACIÓN DE LANGEIER (ISL) [4]

El Índice de Saturación de Langelier (ISL) es un modelo matemático del equilibrio derivado del grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio ($CaCO_3$). La ecuación expresa la relación entre el pH, el calcio, la alcalinidad total, los sólidos disueltos y la temperatura con la solubilidad del $CaCO_3$ en aguas con un pH de 6,5 a 9,5 [4]. Empleando una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2010 de donde se realizaron los cálculos para obtener las expresiones del Factor A (para TDS), Factor B (para temperatura), Factor C (para dureza cálcica) y Factor D (alcalinidad total). Una vez calculados los diversos factores se calcula el pHs (pH de saturación) (ver Ecuación 14).

$$pHs = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (14)$$

Dónde: pHs: pH de saturación.
 A : $\frac{(\log_{10} [TDS (mg \cdot L^{-1})] - 1)}{10}$
 B : $[-13,12 \times \log_{10} (T (^{\circ}C + 273))] + 34,55$
 C : $\log_{10} \left[D_{Calcica} \left(\frac{mg}{L} CaCO_3 \right) \right] - 0,4$

Finalmente, se calculó el ISL (ver Ecuación 15).

$$ISL = pH - pHs \quad (15)$$

Dónde: ISL: Índice de Saturación de Langelier.

Un ISL positivo (+) señala una sobresaturación de carbonatos, lo que propicia la formación de sarro y un comportamiento alcalino. Por el contrario, ISL negativo (-) indica una sub-saturación, resultando en agua más ácida y con tendencia a la corrosión. Un valor cercano a cero sugiere un equilibrio y, por lo tanto, un comportamiento neutro del agua (ver TABLA 1) [8].

TABLA 1

Tendencia del agua según valor del Índice de Saturación de Langelier (ISL) [8].

ISL	Tendencia del agua
+0,3 a +2,0	Incrustación alta.
0,0 a +0,3	Incrustación ligera con corrosión.
0,0	Equilibrada. Puede ocurrir corrosión ligera.
0,0 a -0,3	Corrosión ligera. No se forman incrustaciones
-0,3 a -2,0	Corrosión alta.

2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos se analizaron empleando una hoja de cálculo Microsoft Excel 2010 para Windows, obteniéndose una estadística descriptiva, determinándose su media aritmética ($\bar{x}$) y desviación estándar (s).

2.7.1 MEDIA ($\bar{x}$)

Es la medida más utilizada para definir un valor central de un conjunto de datos. Se utiliza para reportar el valor más representativo de un conjunto de mediciones [14], [19] (ver Ecuación 16).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (16)$$

Dónde: $\bar{x}$: Media.
 x_i : Valor numérico obtenido de la medida.
 n : Número de mediciones realizadas.

2.7.2 DESVIACIÓN ESTÁNDAR MUESTRAL (S)

Representa el grado de variabilidad o dispersión. Es una estimación de la precisión basada en las desviaciones de datos individuales con respecto a la media de una muestra de datos [14], [19] (ver Ecuación 17).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} \quad (17)$$

Dónde: s: Desviación estándar muestral (s).
 $x_i - \bar{x}$: Desviación de x_i del valor $\bar{x}$ de la media $\bar{x}$.
 n - 1: Número de grados de libertad.

2.7.3 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON [20]

Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson ya que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas. Es fundamental distinguir que lo que mide el coeficiente de Pearson es la fuerza y la dirección de la relación lineal entre las variables. Así, un $r_{XY} = \pm 1$ indicará que hay una perfecta asociación lineal positiva o negativa –según sea el signo– entre X y Y. En este orden de ideas, un $r_{XY} = 0$ será evidencia de que no existe relación lineal entre las características de interés, pero no constituye prueba alguna de independencia. En otras palabras, si el coeficiente de correlación es nulo, únicamente se podría establecer que no hay asociación lineal entre las variables aunque pueda existir otro tipo de vinculación [20] (ver Tabla 2).

TABLA 2

Interpretación de Coeficiente de correlación de Pearson [21].

Valor	Interpretación
$r < 0$	Correlación negativa, las dos variables se correlacionan en sentido inverso. A valores altos de una de ellas le suelen corresponder valores bajos de la otra y viceversa.
$r > 0$	Correlación positiva, las dos variables se correlacionan en sentido directo. A valores altos de una le corresponden valores altos de la otra e igualmente con los valores bajos.
$r = 0$	No hay correlación entre las variables.

Se supone que la relación se da entre X y Y, pero aplica a cualquier par de variables. Se plantea el valor absoluto del coeficiente, de modo que la magnitud es independiente del signo (ver Tabla 3).

TABLA 3

Interpretación de la magnitud del coeficiente de correlación de Pearson según las sugerencias de Cohen [20].

Rango de valores de r_{XY}	Interpretación
$0,00 \leq r_{XY} < 0,10$	Correlación nula

$0,10 \leq r_{XY} < 0,30$	Correlación débil
$0,30 \leq r_{XY} < 0,50$	Correlación moderada
$0,50 \leq r_{XY} < 1,00$	Correlación fuerte

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

3.1.1 CALIBRACIÓN DEL PHMETRO

La calibración del instrumento arrojó un coeficiente de correlación (R^2) de 0,9999, lo que demuestra una relación lineal entre los valores de pH de los buffers y las lecturas del equipo. Esto asegura que el pHmetro proporciona mediciones precisas y confiables, garantizando la exactitud de los datos de pH obtenidos para el estudio (ver Fig. 4).

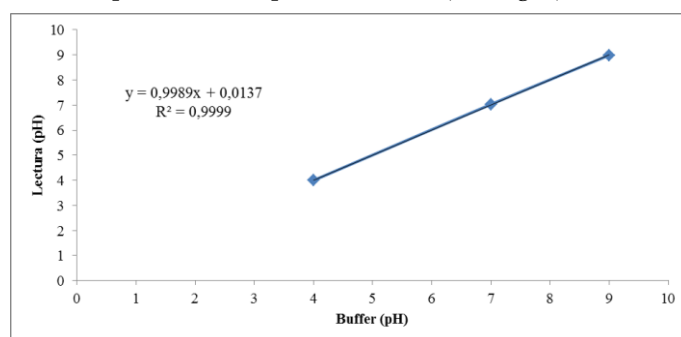


Fig. 4. Regresión lineal de la calibración del equipo.

3.1.2 CALIBRACIÓN DEL TITULADOR AUTOMÁTICO

La calibración del instrumento arrojó un coeficiente de correlación (R^2) de 1, esto indica una excelente relación entre el volumen nominal y el volumen real dispensado por el instrumento. Estos resultados garantizan que el titulador automático es altamente preciso y confiable para las mediciones volumétricas, validando su idoneidad para análisis cuantitativos (ver Fig. 5).

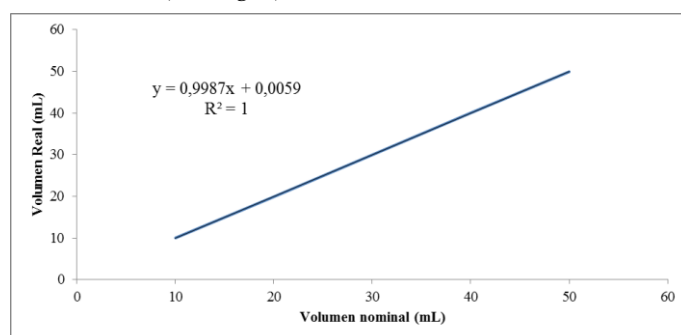


Fig. 5. Regresión lineal de la calibración del equipo.

3.1.3 ESTANDARIZACIÓN DE LAS DISOLUCIONES TITULANTES

Se estandarizaron las disoluciones de hidróxido de sodio (NaOH), ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido etilendiamino-tetraacético (EDTA). El análisis de los datos de media y des-

viación estándar de sus concentraciones revela una excelente precisión en la preparación y estandarización de estas disoluciones. Obteniéndose, una desviación estándar notablemente baja ($0,0002 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ para NaOH y $0,0001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ para el H_2SO_4 y el EDTA) (ver Tabla 4). Esto valores indica una alta reproducibilidad en el proceso de calibración, lo que se traduce directamente en una gran confianza en la exactitud de las concentraciones de los titulantes.

TABLA 4

Resultados de estandarización de disoluciones titulantes (concentración media y desviación estándar).

Titulante	V _{titulante} (mL)	M _{titulante} (mol·L ⁻¹)	Media (mol·L ⁻¹)	Desviación es- tándar (mol·L ⁻¹)
Hidróxido de sodio (NaOH)	3,09	0,0160	0,0162	0,0002
	3,14	0,0164		
	3,13	0,0161		
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	5,76	0,0094	0,0094	0,0001
	5,79	0,0094		
	5,84	0,0095		
EDTA	20,10	0,0099	0,0098	0,0001
	20,13	0,0098		
	20,11	0,0098		

3.1.4 PARÁMETROS FÍSICO – QUÍMICOS

Los datos históricos del agua de alimentación al sistema de enfriamiento cerrado, correspondientes a los valores promedios anuales de pH, alcalinidad total (A_{Total}), dureza cálcica ($D_{\text{cálcica}}$), sólidos totales disueltos (TDS) y temperatura (K) desde el año 2010 – 2024. Asimismo, se reportan correspondientes al 2025 (desde enero hasta abril) (ver Tabla 5).

TABLA 5

Parámetros de calidad (promedios anuales) del agua de alimentación al sistema de enfriamiento cerrado

Año	pH	A _{Total} (ppm)	D _{Total} (ppm)	TDS (ppm)	T (°C)
2010	8,46	13,65	24,55	3,05	25,00
2011	7,48	11,39	19,18	2,25	25,00
2012	7,82	12,10	20,43	2,21	25,00
2013	7,14	10,41	23,64	2,06	25,00
2014	6,34	6,41	17,89	2,14	25,00
2015	6,49	9,60	17,39	2,00	25,00
2016	5,84	7,14	16,18	3,55	25,00
2017	5,16	6,09	15,07	2,61	25,00
2018	5,91	6,08	7,94	2,00	25,00
2019	6,39	9,27	11,94	2,30	25,00
2020	6,16	8,89	17,48	2,52	25,00
2021	5,34	7,39	11,47	2,92	25,00
2022	5,10	5,50	6,32	2,07	25,00
2023	4,88	5,09	4,90	1,27	25,00
2024	4,73	4,97	3,31	2,00	25,00

2025	4,93	5,16	3,99	1,78	25,00
------	------	------	------	------	-------

3.1.4.1 pH

Se observó una constante disminución del pH a lo largo del tiempo, pasando de valores iniciales alcalinos de pH 8,46 (2010) a valores ácidos (pH <5,5) a partir del año 2017, con un valor mínimo de pH 4,73 en el año 2024. Aunque se aprecia una ligera recuperación en el 2025 (pH 4,93), la marcada tendencia hacia la acidez indica un alto riesgo de corrosión para los equipos. Se puede observó que los valores descenden en el tiempo desde el año 2010 (ver Tabla 5). En términos de calidad del agua, al comparar los valores obtenidos con los valores pH deseables en el agua potable (pH entre 6,4 y 8,5) [22], sólo en el periodo comprendido entre los años 2010 y 2013 logró mantenerse dentro de estos valores deseables, descendiendo considerablemente a partir del 2014. La corrosividad del agua disminuye a medida que aumenta la alcalinidad donde es necesario proporcionar un pH estable en todo el sistema de distribución para el control de la corrosión de las tuberías metálicas [4].

3.1.4.2 ALCALINIDAD TOTAL

La alcalinidad total experimenta una reducción considerable desde 13,65 ppm (2010) hasta valores <6,5 ppm (2014), con un marcado descenso en los años recientes (ver Tabla 5). La disminución observada, podría ser un factor contribuyente a esta acidificación y en consecuencias al aumento de la corrosividad del agua.

3.1.4.3 DUREZA CÁLCICA

La dureza cálcica presenta una tendencia decreciente aún más pronunciada, pasando de 24,55 ppm (2010) en un constante descenso hasta el año 2018, con ligeros periodos de aumento y recuperación (2013) y con una marcada tendencia decreciente. Siendo, el año 2019 la última recuperación y de nuevo la marcada tendencia decreciente hasta valores de 3,99 ppm (2025) (ver Tabla 5). En términos de calidad del agua, al comparar los valores obtenidos con los valores deseables en el agua potable (250 mg/L CaCO_3) [22], durante todo el periodo de estudio se reportaron valores muy por debajo del valor deseable, (<24,55 mg/L CaCO_3), la reducción en la dureza cálcica podría estar relacionada con esta tendencia corrosiva. Una capa uniforme de carbonato de calcio (CaCO_3), depositada sobre las superficies metálicas, separa físicamente el metal del ambiente corrosivo [23]. Es decir, en sistemas con una dureza moderada y una alcalinidad adecuada, el agua puede tener una ligera tendencia a formar una fina capa de CaCO_3 en las superficies metálicas. Esta capa, si es uniforme y está bien adherida, puede actuar

como una barrera protectora, aislando el metal del agua y reduciendo la velocidad de corrosión.

3.1.4.4 SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (TDS)

Los TDS muestran diversas fluctuaciones menores sin una tendencia clara y se mantienen en niveles generalmente bajos (ver Tabla 5). Por otra parte, bajos niveles de TDS podrían señalar una insuficiencia de minerales que podrían ayudar a inhibir la corrosión o formar capas protectoras en las superficies metálicas. En términos de calidad del agua, al comparar los valores obtenidos con los valores deseables en el agua potable ($600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) [22], durante todo el periodo de estudio se reportaron valores muy por debajo del valor deseable ($<3,55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

3.1.4.5 TEMPERATURA

En el caso de la temperatura del agua, presentaron valores constante y estable a 25°C durante todo el período objeto de estudio (ver Tabla 5).

3.2 ÍNDICE DE SATURACIÓN DE LANGELIER (ISL)

El Índice de Saturación de Langelier (ISL) obtenido es negativo y con grandes valores en magnitud. Estos valores han ido en incremento del carácter corrosivo del agua, a través de los años según estudio realizado desde el 2010, observándose que los valores calculados de ISL en la actualidad se mantienen con un carácter corrosivo elevado (ver Fig. 6). Un ISL negativo indica que el agua está sub-saturada con respecto al carbonato de calcio (CaCO_3) y, por lo tanto, tiene una tendencia a ser corrosiva [7]. Cuanto más negativo es el ISL, mayor es la tendencia a la corrosión [8].

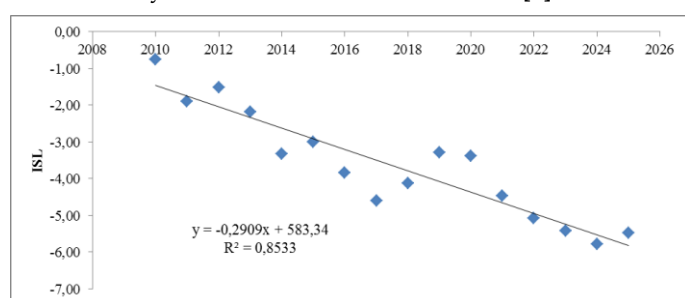


Fig. 6. Tendencia de variación del Índice de Saturación de Langelier (ISL) en el agua de alimentación al sistema cerrado de BRIQCAR, CA (2010-2025).

La tendencia del Índice de Saturación de Langelier (ISL), la regresión lineal ($y = -0,2909x + 583,44$) muestra una tendencia decreciente del ISL a lo largo de los años, con pendiente de $-0,321$ indica que el ISL disminuye, en promedio $0,321$ unidades por año (ver Fig. 6). La tendencia decreciente y negativa del ISL indica que el agua posee una tendencia a ser más corrosiva con el tiempo.

3.3 MATRIZ DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS MEDIDOS Y EL ÍNDICE DE SATURACIÓN DE LANGELIER (ISL).

Se trató de identificar los parámetros que afectan significativamente en el Índice de Saturación de Langelier (ISL), un análisis de correlación de Pearson (r) permitió cuantificar la relación lineal entre los parámetros: pH, Alcalinidad Total, Dureza cálcica, TDS, la Temperatura y el ISL (ver Tabla 6).

TABLA 6

Matriz de correlación entre los parámetros fisicoquímicos y el Índice de Saturación de Langelier

	pH	AlcTotal	Dcálcica	TDS	T	ISL
pH	1					
AlcTotal	0,96	1				
Dcálcica	0,87	0,85	1			
TDS	0,29	0,34	0,47	1		
T	0,00	0,00	0,00	0,00	1	
ISL	0,99	0,96	0,92	0,34	0,00	1

El Índice de Saturación de Langelier (ISL) presenta una relación extremadamente fuerte y positiva con el pH ($r=0,99$), esto confirma que la disminución progresiva del pH es la principal causa de la caída del ISL. En cuanto a la alcalinidad total también se observa una correlación muy fuerte y positiva con el ISL ($r=0,96$). La alcalinidad actúa como una capacidad de amortiguación del agua; por lo tanto, la pérdida de esta capacidad está directamente ligada al empeoramiento del carácter corrosivo. De igual manera para la Dureza cálcica ($r=0,92$) por lo tanto el ISL se mueven en la misma dirección. Estos valores indican que a medida que el pH, la alcalinidad y la dureza cálcica disminuyen el ISL tiende a bajar haciéndose más negativo, lo que directamente se traduce en un aumento en el potencial corrosivo del agua.

4 CONCLUSIONES

Los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación al sistema de enfriamiento cerrado de BRIQCAR (2010-2025), revelaron una tendencia significativa al descenso en los niveles de pH, alcalinidad total y dureza cálcica a lo largo de los años. El cálculo anual del Índice de Saturación de Langelier (ISL) mostró una tendencia decreciente, resultando en valores progresivamente más negativos. Esto indica una tendencia del agua a ser corrosiva, lo que representa un riesgo para la integridad de los equipos lo que concuerda con el incremento de reporte de fugas. El análisis de la tendencia del ISL confirmó una disminución significativa. El análisis de la matriz de correlación confirma que el descenso del pH, la alcalinidad total y la dureza cálcica no son eventos aislados, sino que están interrelacionados. La pérdida de

alcalinidad y dureza contribuye directamente a la caída del pH, lo cual es el principal impulsor del aumento del potencial corrosivo. Esta tendencia respalda la hipótesis de que la calidad del agua ha evolucionado a condiciones corrosivas del agua que compromete la integridad de los equipos.

5 REFERENCIAS

- [1] Gaceta Oficial 38.595, «Ley de Aguas: Asamblea Nacional,» 02 Enero 2007. [En línea]. Available: <https://www.asambleanacional.gob.ve/storage/documentos/leyes/ley-de-agu-20220208194620.pdf>. [Último acceso: 02 Febrero 2025].
- [2] V. Mora Arellano y J. L. Cedeño, «Valuación de corrosión e incrustaciones en instalaciones hidráulicas de una planta de potabilización en el estado Bolívar, Venezuela,» 2006. [En línea]. Available: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482006000100008. [Último acceso: 30 Agosto 2025].
- [3] C. De Sousa, A. Correia y M. C. Colmenares, «Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control,» 2010. [En línea]. Available: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482010000200003. [Último acceso: 30 Agosto 2025].
- [4] A. Awatif, K. Basim y A. Sura, «Evaluating Water Stability Indices from Water Treatment Plants in Baghdad City,» *Journal of Water Resource and Protection*, vol. VI, n° 14, pp. 1344-1351, 2014. <https://doi.org/10.4236/jwar.2014.614124>
- [5] evapco, «Closed circuit cooler. Instrucciones de operaciones de mantenimiento,» EVAPCO, Inc, Westminster, USA.
- [6] J. F. Rios, J. A. Calderón, F. Echeverría y G. Peñuela, «Diseño de un sistema piloto para el estudio de la corrosión del material de tubería y su contribución en el deterioro de la calidad del agua potable,» *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, n° 43, pp. 102-113, 2008.
- [7] Hanna Instruments, «Equilibrio del agua. Índice de Langelier,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.hannainst.es/blog/790/equilibrio-del-agua-indice-de-angelier>. [Último acceso: 05 Enero 2025].
- [8] Carbotecnia, «La tendencia incrustante, corrosiva o equilibrada de un agua, y el Índice de saturación de Langelier,» 20 Junio 2024. [En línea]. Available: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/como-se-calcula-el-indice-de-angelier/>. [Último acceso: 06 Diciembre 2024].
- [9] UPEL, *Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales*, Quinta ed., Caracas: FEDUPEL, 2016.
- [10] COVENIN 2614, «Agua Potable. Toma de muestra,» FONDONORMA, Caracas, 1994.
- [11] COVENIN 2709, «Aguas naturales, industriales y residuales. Guía para las técnicas de muestreo,» Fondonorma, Caracas, 2024.
- [12] Práctica Operativa POP10LE01, «pHmetro Metrohm, 781,» Gerencia de Mantenimiento, Puerto Ordaz, 2009.
- [13] COVENIN 2462, «Aguas naturales, industriales y residuales : Determinación del pH,» FONFONORMA, Caracas, 2002.
- [14] D. Skoog, D. West, F. Holler y S. Crouch, *Fundamentos de química analítica*, Novena ed., México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., 2015.
- [15] D. Harris, *Análisis Químico Cuantitativo*, Tercera ed., Barcelona: REVERTÉ, 2016.
- [16] COVENIN 2188, «Agua potable. Determinación de alcalinidad,» FONDONORMA, Caracas, 1984.
- [17] COVENIN 2408-86, «Agua- Determinación de Dureza Total y Calcio. Método volumetrico. Dterminación de Magnesio por cálculo,» FONDONORMA, Caracas, 1986.
- [18] COVENIN 2461, «Agua natural, industrial y residual, Determinación de sólidos,» FONDONORMA, Caracas, 1987.
- [19] J. N. Miller y J. C. Miller, *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*, Cuarta ed., Madrid: Pearson Educación S.A., 2002.
- [20] J. D. Hernández Lalinde, F. Espinosa Castro, J. E. Rodríguez, J. G. Chacón Rangel, C. A. Toloza Sierra, M. K. Arenas Torrado, S. M. Carrillo Sierra y V. J. Bermúdez Pirela, «Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones,» *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, vol. XXXVII, n° 5, pp. 587-601, 2018.
- [21] A. D. Pauta y D. A. Quezada, «Determinación de la tendencia corrosiva e incrustante del agua potable distribuida en la ciudad de Azogues,» Cuenca, Ecuador, 2017.
- [22] Ministerio de Sanidad y Asistencia Social, «Normas Sanitarias de calidad del agua potable,» Caracas, 1998.
- [23] Water Technologies, «Capítulo 24 - Control de la corrosión - Sistemas de refrigeración,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-24-corrosion-control-cooling-systems>. [Último acceso: 05 Junio 2025].

6 BIOGRAFÍAS

Zulennys del Carmen Marcano Marín, egresada del Instituto Universitario de Tecnología José Antonio Anzoátegui - Estado Anzoátegui obteniendo el título de Técnico Superior Universitario en Química, mención Procesos Químicos. Con diez años de experiencia en tratamiento de agua potable en la empresa estatal Hidrobolivar ejerciendo el cargo de analista de control de calidad y nueve años de experiencia en procesos de reducción directa Midrex. Actualmente como superintendente (E) de procesos y automatización adscrita a la gerencia técnica y proyectos en la empresa Briqcar, C.A.

José Castro-Soto. Licenciado en Química egresado de la Universidad De Oriente (Núcleo de Sucre). Con más de 15 años de experiencia en la educación universitaria. Ha sido jefe de la División de Laboratorio (Gerencia de Control de Calidad - HIDROBOLÍVAR C.A.). Actualmente, se desempeña como Jefe del Departamento del Programa Nacional de Formación en Química (PNFQuímica) en la Universidad Politécnica Territorial del Estado Bolívar (UPTBolívar).