

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD XOCHIMILCO DIVISIÓN
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD DEPARTAMENTO DE SISTEMAS
BIOLÓGICOS**

LICENCIATURA EN QUÍMICA FARMACÉUTICA BIOLÓGICA

PROYECTO DE SERVICIO SOCIAL

Título: Control fisicoquímico y de producción de agua producida en el CEPAX

Alumno:

López Martínez Diego Tristan

Matrícula:

2202029607

Asesores:

M. en C.F. Leticia Ortega Almanza (35538)

M. en C.F. José Eduardo Hernández Torres (43814)

Lugar de realización: Centro de Producción de Agua Xochimilco (CEPAX), Edificio
N (UIDIS) Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco

Fecha de inicio y terminación: 09 de julio de 2025 – 08 de enero de 2026

Índice

1. Introducción
2. Planteamiento del problema
3. Justificación
4. Objetivo General
5. Objetivos Particulares
6. Marco teórico
 - 6.1. Agua
 - 6.1.1. Química del agua
 - 6.1.2. Tipos de agua
 - 6.2. Normatividad
 - 6.3. Pruebas fisicoquímicas aplicadas en análisis de agua purificada
 - 6.4. Pruebas organolépticas
 - 6.5. Tipos de garrafrones
 - 6.6. Defectos más comunes
 - 6.7. Medidas de cuidado
7. Metodología
8. Discusión y resultados
9. Conclusiones
10. Perspectivas a futuro
11. Referencias
12. Anexos

1. Introducción

El agua constituye el recurso natural más esencial para la vida en el planeta. En el cuerpo humano representa aproximadamente el 70 % de la masa corporal, mientras que en organismos como las algas puede alcanzar hasta el 98 % (Valenzuela, 2014). Su participación en funciones vitales —respiración, termorregulación, transporte de nutrientes, lubricación de tejidos y eliminación de toxinas— hace indispensable su consumo regular; en condiciones normales, una persona puede sobrevivir únicamente entre tres y cuatro días sin hidratación.

En el contexto mexicano, el aseguramiento de la calidad del agua para consumo humano se sustenta en normativas sanitarias oficiales. La NOM-127-SSA1-2021 establece los límites permisibles de calidad física, química y microbiológica para agua de uso y consumo humano, mientras que la NOM-201-SSA1-2015 regula las especificaciones sanitarias para agua y hielo envasados o a granel (Secretaría de Salud, 2015; 2021). El cumplimiento de estas normas exige la implementación de programas de monitoreo que integren análisis fisicoquímicos, microbiológicos y organolépticos.

El Centro de Producción de Agua Xochimilco (CEPAX) es la instalación responsable del suministro interno de agua purificada, desionizada y grado HPLC para la Unidad Xochimilco de la UAM. Dada la diversidad de usos —desde consumo humano hasta aplicaciones analíticas de alta sensibilidad—, el CEPAX requiere un sistema robusto de aseguramiento de la calidad que garantice la inocuidad del producto y la confiabilidad de los procesos de laboratorio que dependen de él.

Además del análisis del agua, el control de calidad debe extenderse a los envases reutilizables (garrafones), los cuales representan una fuente potencial de contaminación cruzada si no se gestionan adecuadamente. La interacción entre el agua purificada y la superficie del envase, así como las condiciones de almacenamiento y transporte, pueden alterar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del producto terminado (García-Ávila et al., 2018). Por ello, el presente trabajo integra el monitoreo de parámetros del agua con la evaluación sistemática del estado de los garrafones, con el fin de identificar desviaciones, establecer causas asignables y proponer acciones correctivas basadas en herramientas estadísticas.

2. Planteamiento del problema

El incumplimiento de las especificaciones establecidas en la NOM-127-SSA1-2021 y la NOM-201-SSA1-2015 respecto a parámetros como pH, cloro residual, sólidos disueltos totales y conductividad puede derivar en agua no apta para consumo humano o inadecuada para aplicaciones analíticas. Asimismo, las condiciones higiénicas de los garrafones y su manipulación deficiente durante el transporte o almacenamiento pueden introducir agentes contaminantes o modificar las propiedades fisicoquímicas del agua (Peña González, 2022).

En México, el consumo de agua embotellada en garrafón constituye una de las prácticas más extendidas para el acceso al agua potable. No obstante, diversos estudios han evidenciado una variabilidad significativa en la calidad de estos productos, particularmente en relación con parámetros fisicoquímicos que garantizan su purificación y seguridad (González-González et al., 2022). Esta problemática adquiere mayor relevancia en instalaciones universitarias, donde el agua purificada no solo se destina al consumo, sino también a la preparación de reactivos, medios de cultivo y técnicas cromatográficas que demandan estándares de pureza estrictos.

3. Justificación

La realización continua de pruebas fisicoquímicas, junto con la aplicación rigurosa de las normas NOM-127 y NOM-201, constituye una estrategia eficaz para mantener altos estándares de calidad en la distribución de agua en garrafón, minimizando riesgos sanitarios y ambientales mediante muestreos diarios y constantes.

El control de calidad debe incluir tanto el análisis del agua como del envase, asegurando que se cumpla con un protocolo estandarizado en cada etapa: desde la recepción y lavado del garrafón hasta el estado del envase previo al almacenamiento del producto terminado. Implementar este tipo de controles no solo protege al consumidor, sino que fortalece el proceso productivo y reduce costos asociados a reprocesos, mermas y reposición de envases.

El presente proyecto se vincula directamente con los módulos *Evaluación de las materias primas para la producción de medicamentos* y *Aseguramiento del control de la calidad en la industria químico farmacéutica*, cuyo objeto de transformación se centra en el estudio de la normatividad nacional e internacional, así como en el cumplimiento de las especificaciones oficiales de calidad.

4. Objetivo General

Evaluar y asegurar la calidad del agua purificada, desionizada y tipo HPLC utilizada en procesos productivos y de laboratorio, mediante un análisis de parámetros fisicoquímicos, pruebas organolépticas del producto terminado y la implementación de un sistema de control de calidad de garrafrones.

5. Objetivos Particulares

1. Establecer un perfil fisicoquímico completo para cada tipo de agua: determinar pH, conductividad, sólidos totales disueltos (TDS), dureza, amonio y pruebas organolépticas para el agua purificada, desionizada y HPLC producida.
2. Implementar un sistema de control de calidad de garrafrones: registrar y monitorear los datos de control de producción diariamente, identificando desviaciones y aplicando acciones correctivas.
3. Comparar los resultados obtenidos con normativas y estándares de calidad aplicables (NOM-201-SSA1-2015 en México, o similares a nivel internacional).

6. Marco teórico

6.1. Agua

El agua es un recurso vital para la vida y el bienestar humano. No solo es esencial para la hidratación, sino también para una amplia gama de actividades domésticas, industriales y agrícolas. Sin embargo, no toda el agua es apta para el consumo humano. La calidad del agua se refiere a sus características físicas, químicas y biológicas que determinan su idoneidad para usos específicos. La garantía de un suministro de agua potable segura es una prioridad en salud pública e industria, y en México está regulada por normas como la NOM-127-SSA1-2021 y la NOM-201-SSA1-2015.

El agua actúa como reguladora térmica en los organismos vivos debido a su elevada capacidad calórica, lo que permite que su temperatura varíe más lentamente que la de otros líquidos. Además, participa en la fotosíntesis como fuente de hidrógeno y en reacciones de hidrólisis, donde las enzimas aprovechan su capacidad para romper enlaces químicos y degradar compuestos orgánicos durante la digestión. También cumple funciones fundamentales como el transporte de sustancias, la lubricación, la protección de órganos, la facilitación de la circulación y el mantenimiento de la turgencia, flexibilidad y elasticidad de los tejidos (Valenzuela, 2014).

Asimismo, el agua interviene como reactivo en múltiples reacciones metabólicas, aportando iones de hidrógeno o hidroxilo. Su importancia es vital en la formación del cuerpo humano y en todos los procesos biológicos. Sin la humedad en los pulmones no sería posible la respiración; sin la saliva, no podríamos ingerir los alimentos; sin el agua presente en la sangre, las células no recibirían nutrientes ni oxígeno, ni podrían eliminar toxinas (Valenzuela, 2014).

A pesar de su importancia, el organismo pierde grandes cantidades de agua a través de la transpiración, la respiración y la excreción urinaria, procesos mediante los cuales se eliminan sustancias de desecho. La falta prolongada de agua puede causar sed intensa, sequedad de la piel y mucosas, fiebre, colapso cardíaco y, en casos extremos, coma y muerte. Sin embargo, el consumo excesivo de agua también puede

generar alteraciones graves que, en situaciones extremas, pueden resultar mortales (Valenzuela, 2014).

6.1.1. Química del agua

El agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno enlazados a un átomo de oxígeno. Los enlaces entre el hidrógeno y el oxígeno son de tipo covalente, ya que ambos comparten pares de electrones. Sin embargo, debido a que el oxígeno presenta una mayor electronegatividad, el par electrónico se encuentra más cercano a este átomo, lo que provoca la polaridad del enlace. La molécula de agua tiene una forma angular con un ángulo de enlace aproximado de 105° (Tejeda Rosales, 2026).

Esta disposición molecular convierte al agua en un dipolo, donde el oxígeno concentra una carga parcial negativa, mientras que los átomos de hidrógeno presentan cargas parciales positivas. Gracias a esta polaridad, las moléculas de agua se atraen entre sí mediante interacciones entre polos opuestos, conocidas como puentes de hidrógeno.

6.1.2. Tipos de agua

Agua purificada. El agua purificada envasada es aquella que ha pasado por procesos físicos o químicos destinados a eliminar microorganismos patógenos, de modo que su consumo no represente riesgos para la salud. Para su venta, este tipo de agua se distribuye en botellones u otros recipientes con cierre hermético y debe cumplir con determinados criterios de calidad. En México, el consumo de agua embotellada es uno de los más altos a nivel mundial, con un promedio anual de 286 litros por persona. Una parte significativa del mercado nacional está conformada por miles de microempresas dedicadas a la purificación de agua (Ortega, 2023).

No obstante, la calidad del agua producida por muchas de estas pequeñas plantas resulta incierta, principalmente debido a la ausencia de sistemas adecuados de monitoreo y auditoría externa que garanticen el cumplimiento de los parámetros bacteriológicos y químicos exigidos. El elevado consumo de este producto se relaciona, en gran medida, con la desconfianza de la población hacia los servicios municipales de agua potable (Ortega, 2023).

Agua desionizada. La creciente modernización y sofisticación de la industria farmacéutica ha provocado que este sector demande cada vez más agua de alta calidad que no interfiera en los procesos productivos. Para satisfacer esta necesidad, se emplea la desmineralización, un proceso basado en el intercambio iónico (Londoño, 2013).

La desionización consiste en la eliminación de sustancias disueltas con carga eléctrica, conocidas como iones, mediante su retención en sitios con carga positiva o negativa dentro de una resina. Este proceso ocurre cuando el agua atraviesa una columna rellena con dicho material y recibe el nombre de intercambio iónico. Dependiendo del método utilizado, es posible obtener agua desionizada con distintos niveles de pureza (Londoño, 2013).

El agua desionizada utilizada en aplicaciones analíticas y de laboratorio debe cumplir con criterios estrictos de pureza que aseguren la confiabilidad de los resultados. De acuerdo con la norma ASTM D1193, el agua se clasifica en distintos tipos según su conductividad, resistividad y contenido de carbono orgánico total; por ejemplo, el agua Tipo II —comúnmente asociada a procesos de desionización— presenta una conductividad máxima de 1.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un contenido orgánico cercano a 50 $\mu\text{g}/\text{L}$, lo que la hace adecuada para la preparación de reactivos y análisis generales de laboratorio (ASTM International, 2022).

Agua para HPLC. El agua grado HPLC representa un nivel aún más exigente de calidad fisicoquímica, diseñado específicamente para ser usado como fase móvil en cromatografía líquida de alta eficiencia y otras técnicas analíticas de alta sensibilidad. En este contexto, las impurezas, incluso en concentraciones extremadamente bajas, pueden generar artefactos como picos fantasmas (*ghost peaks*), ruido de línea base o disminución de la sensibilidad en los detectores. Por esta razón, el agua de grado HPLC se produce mediante la combinación de métodos de purificación como ósmosis inversa, destilación, intercambio iónico y filtración ultrafina, con parámetros de carbono orgánico total (TOC) muy bajos y conductividad prácticamente nula (Shimadzu, 2026).

Una de las principales pruebas fisicoquímicas en la evaluación del agua de laboratorio es la medición de la conductividad eléctrica, la cual permite inferir la

presencia de iones disueltos en la muestra. Cuanto menor sea la conductividad, menor es la cantidad de sales o contaminantes iónicos presentes, lo que es crítico para aplicaciones como HPLC, espectrometría o análisis de trazas químicas. La resistividad, que es el inverso de la conductividad, es igualmente utilizada como medida de pureza, especialmente para agua desionizada y ultrapura (Krol, 2005).

Además de la conductividad y resistividad, el carbono orgánico total (TOC) es otro parámetro clave que se emplea para evaluar la calidad del agua en contextos analíticos. El TOC representa la cantidad total de compuestos orgánicos presentes en el agua y su reducción es esencial para minimizar la interferencia orgánica durante análisis cromatográficos y espectrométricos. Un bajo contenido de TOC está asociado con una mayor precisión en HPLC, ya que compuestos orgánicos residuales pueden generar picos no deseados o afectar la cuantificación de analitos (Krol, 2005).

Otras pruebas como la medición de pH, la detección de partículas en suspensión y el análisis de metales traza también integran el conjunto de pruebas fisicoquímicas que permiten caracterizar y certificar la calidad del agua según el uso al que se destine. La correcta aplicación de estas pruebas garantiza que el agua utilizada en procesos de laboratorio e industriales cumpla con los criterios de pureza requeridos, reduciendo errores analíticos y contribuyendo a la reproducibilidad de los resultados experimentales (Shimadzu, 2026).

El agua HPLC de mayor calidad presenta sólidos disueltos totales < 0.1 mg/L, pH de 5.0–6.5 y una conductividad aproximada de 0.055 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Carrillo, 2007).

6.2. Normatividad

En México, la calidad del agua purificada destinada al uso y consumo humano, particularmente la que se comercializa en garrafrones o envases preenvasados, se rige por la Norma Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2015. Esta norma establece las características y especificaciones sanitarias que deben cumplir tanto el producto final como los establecimientos dedicados a su procesamiento, envasado, almacenamiento, distribución o importación. Asimismo, enfatiza la aplicación de buenas prácticas de higiene y el control del proceso productivo, con el fin de prevenir

contaminaciones que puedan afectar la calidad fisicoquímica y organoléptica del agua (Secretaría de Salud, 2015).

De manera complementaria, la NOM-127-SSA1-2021 regula la calidad del agua destinada al uso y consumo humano desde su fuente hasta el punto de consumo. Esta norma establece los límites permisibles de calidad física, química y microbiológica, así como los tratamientos necesarios para asegurar la potabilidad del agua. Su aplicación es fundamental para evaluar la seguridad sanitaria del agua y constituye la base regulatoria para la vigilancia y el control de los sistemas de abastecimiento y purificación en México (Secretaría de Salud, 2021).

Por otra parte, en el ámbito de los procesos analíticos y de laboratorio, el uso de agua desionizada y agua grado HPLC requiere el cumplimiento de estándares internacionales que garanticen un alto nivel de pureza. La norma ASTM D1193-06 (2018) establece las especificaciones para el agua reactivo, clasificándola en distintos tipos de acuerdo con parámetros como la conductividad, el contenido orgánico y el nivel de impurezas iónicas. Esta norma es ampliamente utilizada como referencia en análisis instrumentales y cromatográficos, ya que su cumplimiento asegura que el agua empleada no interfiera en los resultados analíticos ni introduzca errores por contaminación química o iónica, lo cual resulta crítico en técnicas de alta sensibilidad como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) (ASTM International, 2022).

6.3. Pruebas fisicoquímicas aplicadas en análisis de agua purificada

La calidad fisicoquímica del agua es un factor determinante tanto para su uso en consumo humano como para aplicaciones analíticas y farmacéuticas. Diversos estudios han demostrado que variaciones en parámetros fisicoquímicos pueden afectar la confiabilidad de los resultados de laboratorio, la estabilidad de los procesos analíticos y la seguridad del agua destinada al consumo (Nabulsi y Al-Abbadi, 2014). Por ello, organismos internacionales y farmacopeas han establecido criterios específicos para el control de estos parámetros, particularmente en agua purificada, desionizada y grado HPLC (ASTM International, 2022; United States Pharmacopeia [USP], 2023).

pH. El pH es un parámetro fundamental que indica la acidez o alcalinidad del agua y tiene una influencia directa en la estabilidad química, la corrosividad y la compatibilidad del agua con sistemas analíticos. En aplicaciones de laboratorio y cromatografía, desviaciones en el pH pueden alterar la ionización de analitos, afectar la reproducibilidad de los resultados y dañar columnas cromatográficas (Krol, 2005). Además, el pH influye en la eficacia de procesos de desinfección y en la percepción organoléptica del agua (Nabulsi y Al-Abbadi, 2014).

Conductividad. La conductividad eléctrica es una medida indirecta de la concentración de iones disueltos en el agua y se utiliza ampliamente como indicador de pureza. En agua grado reactivo o HPLC, valores elevados de conductividad sugieren la presencia de sales inorgánicas que pueden interferir con análisis instrumentales de alta sensibilidad (ASTM International, 2022). De acuerdo con la USP <1231>, el control estricto de la conductividad es esencial para garantizar que el agua cumpla con los requisitos farmacéuticos y analíticos (USP, 2023).

Sólidos disueltos totales (TDS). Los sólidos disueltos totales representan la suma de sustancias inorgánicas y orgánicas presentes en forma disuelta en el agua. Concentraciones elevadas de TDS pueden afectar la calidad del agua, provocar incrustaciones en equipos y generar interferencias en técnicas analíticas como la cromatografía líquida (Shimadzu, 2026). En agua purificada y de laboratorio, los TDS deben mantenerse en niveles mínimos para evitar contaminación cruzada y asegurar la confiabilidad de los resultados (Nabulsi y Al-Abbadi, 2014).

Dureza. La dureza del agua está asociada principalmente a la presencia de iones calcio y magnesio. Aunque este parámetro es más relevante en agua de consumo humano, su control también es importante en aplicaciones de laboratorio, ya que la dureza puede favorecer la formación de depósitos minerales en sistemas de purificación y equipos analíticos (ASTM International, 2022). La presencia de agua dura puede reducir la eficiencia de procesos de desionización y afectar la vida útil de columnas y sistemas HPLC (Krol, 2005).

Cloro. El cloro residual se emplea comúnmente como agente desinfectante en sistemas de agua potable; sin embargo, su presencia no controlada en agua destinada a análisis de laboratorio resulta indeseable. El cloro puede reaccionar con

compuestos orgánicos, generar subproductos y afectar la línea base en análisis cromatográficos (Shimadzu, 2026). Por esta razón, los sistemas de purificación de agua para uso analítico incluyen etapas específicas para la eliminación del cloro y otros oxidantes (Nabulsi y Al-Abbadi, 2014).

Amonio. La presencia de amonio en el agua es considerada un indicador de contaminación orgánica o de procesos de purificación incompletos. En aplicaciones farmacéuticas y analíticas, el amonio puede interferir en reacciones químicas, afectar el pH y comprometer la calidad del agua (USP, 2023). Por ello, las normas internacionales establecen límites estrictos para este parámetro en agua grado reactivo y farmacéutico (ASTM International, 2022).

En conjunto, el control de los parámetros fisicoquímicos mostrados en la Tabla 1 resulta indispensable para garantizar la calidad del agua utilizada tanto en procesos de consumo humano como en aplicaciones de laboratorio, farmacéuticas y cromatográficas.

Tabla 1. Valores fisicoquímicos característicos del agua purificada, desionizada y grado HPLC.

Parámetro	Agua purificada	Agua desionizada	Agua grado HPLC (ultrapura)
pH (25 °C)	5.5–8.5	5.0–7.0	5.0–6.5
Conductividad (μS/cm)	≤ 10	≤ 1.0	≤ 0.055
Sólidos disueltos totales (mg/L)	≤ 10	≤ 1	< 0.1
Dureza	≤ 100 mg/L como CaCO ₃ (baja)	No detectable	No detectable
Cloro	≤ 0.2–0.5 mg/L (residual permitido)	Ausente	Ausente

Parámetro	Agua purificada	Agua desionizada	Agua grado HPLC (ultrapura)
Amonio	≤ 0.5 mg/L	No detectable	No detectable
Olor	Inodoro	Inodoro	Inodoro
Sabor	Insípido	Insípido	Insípido
Color	Incoloro	Incoloro	Incoloro

6.4. Pruebas organolépticas

Las pruebas organolépticas del agua consisten en la evaluación de las características sensoriales perceptibles por los sentidos humanos, principalmente olor, sabor, color y turbidez, y se emplean como un método complementario para la verificación de la calidad del agua destinada al consumo humano. Estas pruebas permiten identificar alteraciones sensoriales que pueden estar asociadas a cambios en el proceso de tratamiento, almacenamiento o distribución del agua (Dietrich, 2006; World Health Organization [WHO], 2017).

Olor. La evaluación del olor se realiza mediante la percepción directa del agua a temperatura ambiente, con el objetivo de detectar la presencia de olores extraños o no característicos. Este ensayo permite identificar de manera preliminar la posible presencia de compuestos orgánicos, subproductos de desinfección o contaminación biológica (Dietrich, 2006).

Sabor. La prueba de sabor se lleva a cabo mediante la degustación controlada del agua, siempre que esta cumpla previamente con los criterios microbiológicos de seguridad. Su finalidad es detectar sabores anómalos que puedan estar relacionados con la presencia de sales disueltas, metales o desinfectantes residuales (WHO, 2017).

Color. La evaluación del color se realiza por inspección visual, comparando la muestra con agua de referencia en recipientes transparentes y bajo condiciones de iluminación adecuadas. Este parámetro permite identificar coloraciones anormales

asociadas a materia orgánica, metales disueltos o productos de corrosión (Whelton et al., 2021).

6.5. Tipos de garrafrones

Los garrafrones utilizados para el envasado de agua purificada son recipientes diseñados para el almacenamiento y distribución segura de agua para consumo humano, siendo los más comunes los fabricados a partir de policarbonato (PC) y, en menor proporción, de polietileno de alta densidad (PEAD). El policarbonato es ampliamente utilizado debido a su elevada resistencia mecánica, durabilidad, transparencia y capacidad de reutilización, características que facilitan la inspección visual del agua y el control de calidad durante el proceso de envasado (Bach et al., 2014).

Diversos estudios han señalado que el material del envase influye directamente en la estabilidad fisicoquímica y organoléptica del agua, ya que factores como la permeabilidad al oxígeno, la interacción con compuestos orgánicos y la resistencia al lavado determinan la conservación del producto (Westerhoff et al., 2008). Por esta razón, los garrafrones reutilizables deben cumplir con criterios estrictos de calidad del material, diseño sanitario y compatibilidad con procesos de limpieza y desinfección, a fin de minimizar riesgos de contaminación.

6.6. Defectos más comunes

Durante su ciclo de vida, los garrafrones pueden presentar defectos físicos y sanitarios que afectan la calidad del agua almacenada. Entre los defectos más frecuentes se encuentran las rayaduras internas, el opacamiento del material, la deformación del envase y la presencia de fisuras, los cuales favorecen la adhesión de materia orgánica y el desarrollo de biopelículas microbianas (Douterelo et al., 2016). Estas condiciones dificultan la eliminación completa de contaminantes durante el lavado y desinfección.

Asimismo, la degradación del material plástico causada por el uso prolongado, la exposición a temperaturas elevadas o el empleo de agentes de limpieza inadecuados puede provocar la migración de compuestos químicos hacia el agua, generando

alteraciones en el sabor y olor (Bach et al., 2014). Desde el punto de vista organoléptico, estos defectos se traducen en rechazo del producto por parte del consumidor, aun cuando el agua cumpla con los límites microbiológicos y fisicoquímicos establecidos (Dietrich, 2006).

6.7. Medidas de cuidado

El cuidado adecuado de los garrafones es un elemento clave dentro de los sistemas de aseguramiento de la calidad del agua purificada. La literatura científica destaca la importancia de realizar una inspección visual sistemática antes de cada ciclo de lavado, con el objetivo de identificar envases dañados o con defectos que comprometan la higiene del producto (Douterelo et al., 2016). Los garrafones que presenten rayaduras profundas, pérdida de transparencia o contaminación persistente deben ser retirados del proceso.

De igual forma, es fundamental aplicar procedimientos estandarizados de limpieza y desinfección, empleando detergentes y desinfectantes compatibles con el material del envase y controlando variables como concentración, tiempo de contacto y temperatura. Un manejo inadecuado durante el almacenamiento y transporte también puede favorecer la recontaminación del envase y la alteración de las propiedades sensoriales del agua (Westerhoff et al., 2008).

No exponer a luz solar directa. La exposición prolongada a la radiación solar puede favorecer reacciones fotoquímicas en los envases plásticos, provocando la liberación de compuestos hacia el agua y alterando su calidad. Estudios han demostrado que factores ambientales como la luz y la temperatura influyen en la migración de sustancias desde materiales plásticos, además de favorecer el crecimiento de microorganismos fotosintéticos cuando existen condiciones adecuadas (Westerhoff et al., 2008; Bach et al., 2014).

No exponer a fuentes de calor. Las temperaturas elevadas aceleran los procesos de degradación del plástico y pueden incrementar la actividad microbiana en el agua almacenada. Westerhoff et al. (2008) observaron que el aumento de temperatura favorece la lixiviación de antimonio desde botellas de PET, lo que podría comprometer la seguridad del agua si se superan ciertos niveles. Asimismo, la

Organización Mundial de la Salud señala que el almacenamiento adecuado del agua potable debe evitar condiciones térmicas que promuevan el deterioro de su calidad (WHO, 2017).

No llevar con otras sustancias. El uso de garrafrones para almacenar líquidos distintos al agua puede generar contaminación química residual difícil de eliminar, incluso después del lavado. La reutilización inadecuada de envases se asocia con riesgos toxicológicos debido a la posible interacción entre el material del recipiente y las sustancias almacenadas previamente (Bach et al., 2014).

No colocar directamente en el piso. El contacto directo con el suelo incrementa la probabilidad de contaminación por microorganismos presentes en superficies y polvo ambiental. Las investigaciones sobre sistemas de distribución de agua han demostrado que los microorganismos pueden transferirse fácilmente desde el entorno hacia los recipientes, favoreciendo la formación de biopelículas y el deterioro microbiológico del agua (Douterelo et al., 2016).

7. Metodología

7.1. Pruebas fisicoquímicas para agua purificada, desionizada y tipo HPLC

Se realizaron las pruebas de pH, conductividad y sólidos disueltos totales con el equipo *Waterproof HI98129* (Figura 1); asimismo, se determinó el cloro residual mediante el kit analizador *012-003-A001*, la dureza con el kit *5-B DUREZA 0-30 GPG* y el amonio con el kit *HI3824*. Adicionalmente, se llevaron a cabo pruebas organolépticas de color, olor, sabor y apariencia mediante evaluación sensorial directa del agua, seleccionando diariamente un garrafón producido al azar. Cabe mencionar que no se realizaron pruebas al agua tipo HPLC, ya que durante el periodo de estudio no se contó con producción de este tipo de agua.



Figura 1. Medidor de bolsillo Combo.

Pruebas de pH, conductividad y sólidos disueltos totales

A continuación, se muestran los pasos para la utilización del equipo *Waterproof HI98129*. Con base al PNO interno del CEPAX: PARA EL USO ADECUADO DEL MEDIDOR DE BOLSILLO COMBO DE pH/CONDUCTIVIDAD/TDS (RANGO BAJO). Código: PNO-FQ-002.

1. Seleccionar Modo de Medición: Presione el botón SET/HOLD para seleccionar el modo de pH, EC o TDS según lo que desees medir.
2. Medición de pH:
 - 2.1. Sumerja el electrodo en la solución a medir.
 - 2.2. Espere a que el indicador de estabilidad desaparezca antes de leer el valor de pH en la pantalla.
3. Medición de EC/TDS:
 - 3.1. Seleccione el modo EC o TDS usando el botón SET/HOLD.
 - 3.2. Coloca el electrodo en aproximadamente 40mL solución a medir, verificando que esta se encuentre en reposo.
 - 3.3. Espera a que el indicador de estabilidad desaparezca y lee el valor de EC o TDS en la pantalla.
4. Finalizar Medición: Una vez que haya terminado, puede apagar el medidor presionando el botón /MODE desde el modo de medición.
5. Mantenimiento: Limpia el electrodo después de cada uso y almacénalo en la solución de almacenamiento adecuada para prolongar su vida útil.

Prueba de cloro residual mediante el kit analizador 012-003-A001

A continuación, se muestran los pasos para la prueba de cloro residual, con base al PNO interno del CEPAX: PARA EL USO ADECUADO DEL TEST KIT ANALIZADOR DE CLORO Y pH. Código: PNO-FQ-004

KIT: Analizador de cloro y pH Marca: Panda Pool Products (Figura 2).



Figura 2. Kit de cloro y pH

Contenido: El kit incluyó solución OTO (ortotolidina) de ½ oz, solución de Fenol rojo de ½ oz y un medidor colorimétrico.

1. Enjuague el vial con agua desionizada antes de usarse.
2. Llene el vial del medidor colorimétrico de cloro con la muestra hasta la marca.
3. Añada 4 gotas de solución OTO al vial con la muestra.
4. Cubra el vial con la tapa e invierta varias veces el recipiente para mezclar.
5. Compare la lectura con la banda coloreada de Cl.
6. Deseche la muestra y enjuague nuevamente el vial con agua desionizada.

Prueba de dureza con el kit 5-B DUREZA 0-30 GPG

A continuación, se muestran los pasos para la prueba de dureza, con base al PNO interno del CEPAX: PARA EL USO ADECUADO DEL TES DE DUREZA. Código: PNO-FQ-003.

KIT: Prueba de dureza total MARCA: Hach® MODELO: 5-B. Figura 3.



Figura 3. Kit de dureza

1. Enjuague el tubo de medición y la botella cuadrada con agua desionizada antes de su uso.
2. Llene el tubo de medición hasta el tope con la muestra de agua.
3. Vierta la muestra del tubo en la botella cuadrada.
4. Agregue una cucharada de reactivo UniVer a la botella con muestra y mezcle hasta su completa disolución.
5. Agregue la solución de valorante EDTA gota a gota a la botella con mezcla mientras la agita, cuando el color de la muestra cambie de rosa a azul registre el número de gotas añadidas.
6. El número de gotas indica la dureza total de la muestra en granos por galón de CaCO_3 (1 gpg = 17,1 mg/l).
7. Deseche la muestra y enjuague la botella cuadrada y el tubo de medición con agua desionizada.

Prueba de amonio con el kit HI3824

A continuación, se muestran los pasos para la prueba de dureza, con base al PNO interno del CEPAX: PARA EL USO ADECUADO DEL TEST KIT DE AMONÍACO PARA AGUA DULCE HI3824 MARCA HANNA. Código: PNO-FQ-001

KIT: Prueba de amoniaco para agua dulce. MARCA: HANNA Instruments. MODELO: HI3824. Figura 4.



Figura 4. Test Kit de amoniaco para agua dulce

1. Retire la tapa del vaso de plástico y enjuáguelo con la muestra de agua que se va a analizar (esto evita contaminación cruzada).
2. Llene el vaso incluido en el kit hasta la marca de 10 mL con la muestra de agua.
3. Añada 2 gotas del Reactivo NESSLER al vaso con muestra, coloque la tapa al vaso y mezcle con cuidado haciendo movimientos suaves en círculos.
4. Añada 8 gotas del Reactivo 1 al mismo vaso, coloque la tapa nuevamente y mezcle cuidadosamente girando en círculos pequeños.
5. Retire la tapa y vierta la solución en el cubo comparador de color y deje reposar la mezcla durante 5 minutos para que se desarrolle el color.
6. Compare el color de la solución con la escala del cubo comparador, y determine cual color se ajusta más a la solución.
7. Registre el valor correspondiente en mg/L (ppm) de $(\text{NH}_3\text{-N})$.

Posteriormente se compararon los resultados con la normativa aplicable y se construyeron gráficos de control con ayuda del software Minitab 19 (gráficos I-MR, gráficos U de Laney y diagrama de Pareto).

7.2. Control de calidad de garrafones

Se creó un registro que incluye los defectos generales de los garrafones: abollados, rayados, golpeados, con pintura, con materia flotante y etiqueta mal colocada (el formato se encuentra en el Anexo 1). Posteriormente se realizó un gráfico de control de tipo U' de Laney, el cual permite analizar el comportamiento de los defectos por unidad en la producción de garrafones, considerando variaciones que no se ajustan

a una distribución binomial clásica (sobredispersión). El análisis estadístico se ejecutó con el software Minitab 19.

8. Discusión y resultados

8.1. pH de agua purificada

La Figura 5 presenta los resultados obtenidos de la toma de muestra de un garrafón por cada lote producido durante el periodo de estudio. La gráfica I-MR de pH muestra un valor promedio del proceso de $\text{pH} = 8.0$, con límites de control individuales aproximados entre 7.68 y 8.45. La variabilidad mostrada en los rangos móviles fuera de control en los días 3, 4 y 23 se presume que se dio debido al material del garrafón. A pesar de ello, estos datos fuera de control no marcan algún tipo de tendencia que sugiera que el proceso de medición esté en riesgo.

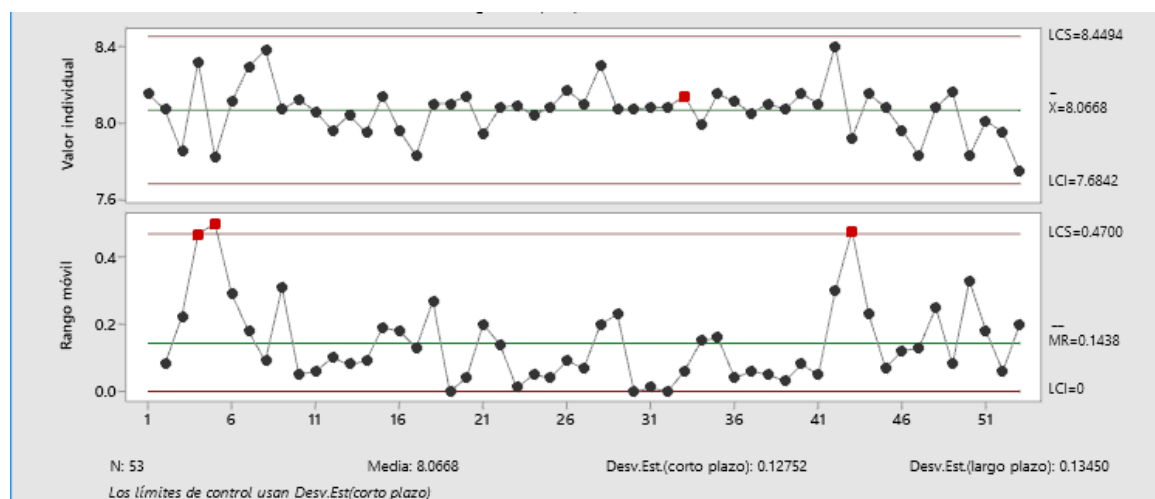


Figura 5. Gráfica de control I-MR para el pH del agua purificada. Los límites de control se establecieron a partir de la media del proceso y el rango móvil promedio. Los puntos fuera de control en el gráfico de rangos móviles (días 3, 4 y 23) indican variabilidad especial atribuible a cambios de envase o condiciones operativas puntuales.

De acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, el pH permitido para agua destinada a uso y consumo humano debe encontrarse en un intervalo de 6.5 a 8.5 (Secretaría de Salud, 2021). Los valores observados se mantuvieron completamente dentro de este

rango, por lo que el agua cumple con los criterios de potabilidad establecidos a nivel nacional.

A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un rango recomendado de pH entre 6.5 y 8.5, indicando que valores dentro de este intervalo no representan un riesgo para la salud humana ni afectan de forma significativa la aceptabilidad del agua (WHO, 2017). Asimismo, la United States Environmental Protection Agency (EPA) considera este mismo intervalo como estándar secundario para la calidad del agua potable, enfocado principalmente en aspectos organolépticos y de corrosividad (EPA, 2023).

Aunque el proceso estadístico muestra estabilidad general, la literatura indica que el garrafón puede influir en pequeñas variaciones del pH, especialmente en sistemas de agua envasada. Los garrafones fabricados con materiales poliméricos de baja calidad o sometidos a múltiples ciclos de reutilización pueden presentar interacciones fisicoquímicas con el agua, favoreciendo procesos de lixiviación, absorción o liberación de compuestos que alteran ligeramente el pH (Silva et al., 2018). En este sentido, el análisis conjunto de la gráfica de individuos (I) y la gráfica de rangos móviles (MR) resulta fundamental, ya que, según la metodología de control estadístico de procesos, el gráfico MR debe interpretarse primero para verificar que la variabilidad del proceso se encuentre bajo control antes de analizar el comportamiento de la media en el gráfico I (Minitab, 2024). La presencia de puntos fuera de control en el MR sugiere que, si bien la media del proceso es estable, existen fuentes de variabilidad a corto plazo —atribuibles a cambios de garrafones o ajustes en el equipo— que deben ser monitoreadas para evitar la propagación de causas especiales.

8.2. pH del agua desionizada

La Figura 6 presenta los resultados obtenidos en la producción de agua desionizada.

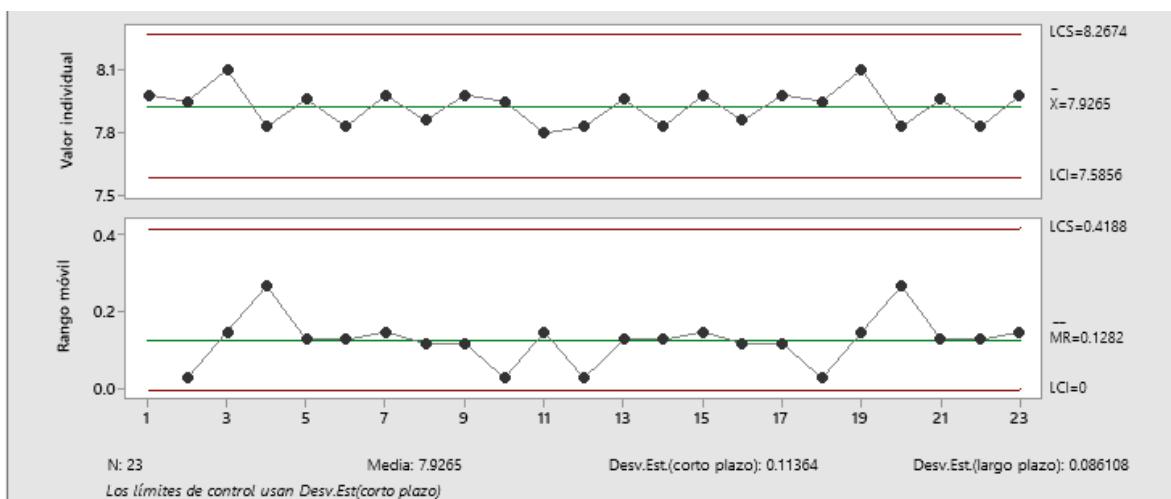


Figura 6. Gráfica de control I-MR para el pH del agua desionizada. El proceso muestra un comportamiento completamente estable, con un 0.0 % de puntos fuera de control, lo que indica la ausencia de causas especiales de variación.

En la gráfica I-MR correspondiente al pH del agua desionizada se observa un comportamiento completamente estable, con un 0.0 % de puntos fuera de control, lo que indica la ausencia de causas especiales de variación. Los valores se mantienen cercanos a la media (≈ 7.92), sin evidencia de tendencias, ciclos o desplazamientos, lo que confirma que el proceso se encuentra bajo control estadístico y presenta una variabilidad mínima (Montgomery, 2019).

El análisis del rango móvil muestra igualmente una dispersión baja y constante entre mediciones consecutivas, lo que indica que el sistema es reproducible y consistente a lo largo del tiempo. Este comportamiento es característico de procesos en los que predominan únicamente causas comunes de variación, sin influencia de factores externos relevantes.

Aunque el pH del agua desionizada no se encuentra regulado de manera específica en normas mexicanas para este tipo de agua, puede realizarse una comparación referencial con la NOM-127-SSA1-2021, la cual establece un intervalo permisible de pH de 6.5 a 8.5 para agua de uso y consumo humano. En este sentido, los valores obtenidos en el presente estudio, con un promedio cercano a 7.9, se encuentran dentro de dicho rango, lo que indica que el agua analizada presenta condiciones adecuadas en términos de equilibrio ácido-base. No obstante, es importante señalar que esta comparación es únicamente orientativa, ya que el pH en agua desionizada

no constituye un parámetro crítico de calidad, debido a su alta susceptibilidad a variaciones por factores ambientales (Secretaría de Salud, 2021).

Desde el punto de vista normativo internacional, las normas aplicables al agua desionizada, como ASTM D1193 y USP <1231>, no establecen límites estrictos para el pH. Esto se debe a que, en agua de alta pureza, el pH puede fluctuar fácilmente por factores ambientales, especialmente por la disolución de CO₂ atmosférico que forma ácido carbónico, alterando el equilibrio del sistema (ASTM International, 2022; USP, 2023). En este contexto, el valor promedio ligeramente alcalino observado puede atribuirse a condiciones propias del sistema de medición, interacción con materiales o características del equipo utilizado. Además, en sistemas de medición no especializados, como el empleado en este estudio, es común que exista una menor precisión en la determinación del pH en aguas de baja conductividad, lo que puede influir en los valores registrados.

8.3. Sólidos disueltos totales del agua purificada

La Figura 7 muestra los datos obtenidos de la prueba de sólidos disueltos totales (TDS) en agua purificada.

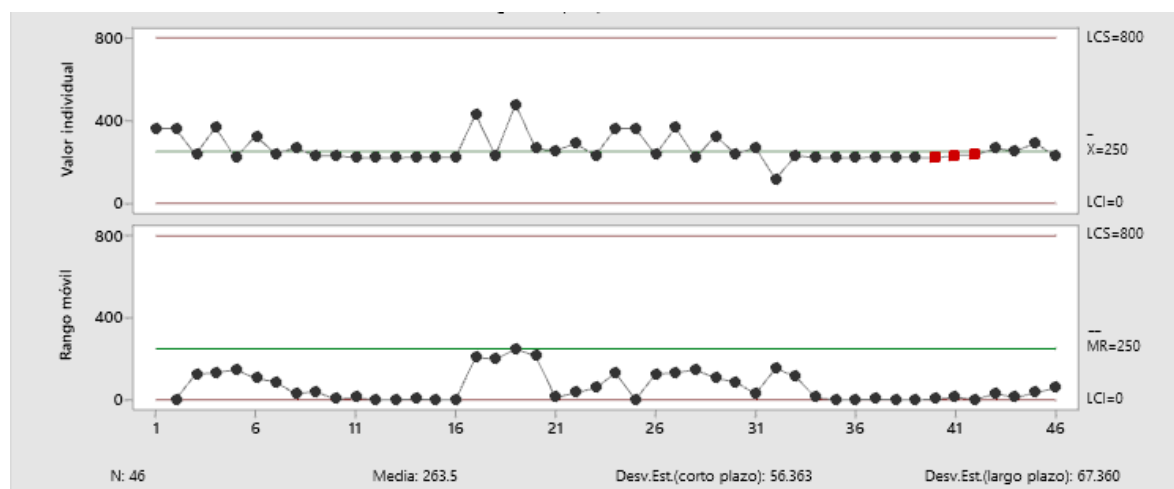


Figura 7. Gráfica de control I-MR para los sólidos disueltos totales del agua purificada. Los puntos señalados como fuera de control en el gráfico de individuos corresponden a fluctuaciones puntuales que no afectan la estabilidad global del proceso.

Los puntos rojos señalados en la Figura 3 como fuera de control no representan necesariamente una inestabilidad real del sistema, sino que pueden corresponder a fluctuaciones normales del proceso dentro de condiciones operativas habituales. En sistemas de tratamiento de agua, pequeñas variaciones en la concentración de sólidos disueltos son esperables debido a cambios menores en la fuente de agua, condiciones de operación o variaciones en el muestreo, sin que esto implique una desviación crítica del proceso (Jiang et al., 2020).

El análisis del rango móvil refuerza esta interpretación, ya que muestra una variabilidad relativamente constante entre mediciones consecutivas, sin incrementos abruptos o sostenidos. Esto sugiere que el proceso mantiene un comportamiento homogéneo en el tiempo, lo cual es característico de un sistema bajo control estadístico. La diferencia entre la desviación estándar de corto y largo plazo es mínima, indicando que no existen cambios estructurales importantes en el proceso.

Desde el punto de vista normativo, todos los valores registrados se encuentran ampliamente por debajo del límite máximo permisible de 1000 mg/L establecido por la NOM-127-SSA1-2021, así como de los criterios internacionales definidos por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2017). Esto confirma que, además de ser estable, el proceso cumple con los requisitos de calidad para agua destinada al consumo humano.

Es importante considerar que durante el desarrollo del estudio se realizó un cambio de garrafones, los cuales presentaban inicialmente ciertas deficiencias en su calidad. Sin embargo, este cambio no generó un impacto significativo en la estabilidad del proceso, lo que sugiere que el sistema de purificación es robusto y capaz de mantener condiciones constantes a pesar de variaciones en el envase. No obstante, estudios han demostrado que el estado de los envases puede influir ligeramente en parámetros fisicoquímicos, por lo que su control sigue siendo un factor relevante en el aseguramiento de calidad (Westerhoff et al., 2008).

8.4. Sólidos disueltos totales del agua desionizada

La Figura 8 presenta la gráfica de control I-MR para los sólidos disueltos totales del agua desionizada, con el fin de analizar el cumplimiento de los requerimientos mínimos de pureza.

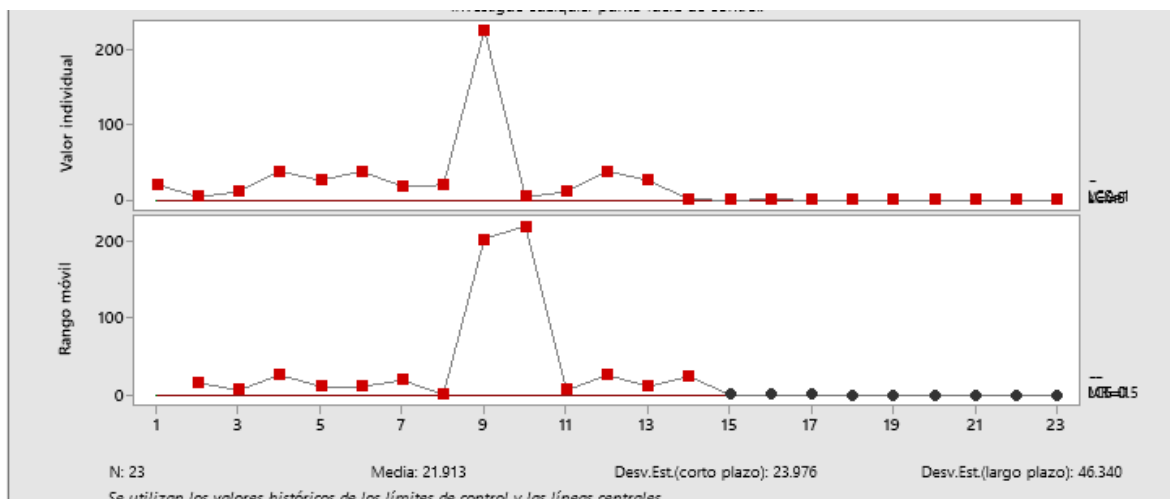


Figura 8. Gráfica de control I-MR para los sólidos disueltos totales del agua desionizada. Se observa una disminución progresiva de los valores a lo largo del periodo de muestreo, lo que sugiere mejoras en el proceso de purificación tras ajustes operativos.

En la evaluación de los sólidos disueltos totales (SDT) en el agua desionizada, se observa que, en las primeras mediciones, los valores presentan concentraciones elevadas en comparación con el comportamiento posterior del proceso. Este incremento inicial puede atribuirse a que el sistema de producción de agua no se encontraba en condiciones óptimas de operación o requería mantenimiento, lo que afectaba la eficiencia del proceso de desionización. Asimismo, la presencia de un valor atípico significativamente alto puede asociarse a un error en el purgado del sistema, lo cual generó una alteración puntual en la medición. Posteriormente, se identifica una mejora progresiva en los resultados, alcanzando valores cercanos a 1 mg/L, lo cual sugiere la implementación de ajustes en el sistema de producción y la aplicación de medidas preventivas previas al llenado, permitiendo una mayor estabilidad en el proceso. Sin embargo, esta aparente mejora debe analizarse considerando las limitaciones del equipo de medición.

El hecho de que los valores no desciendan por debajo de 1 mg/L no permite confirmar que el agua cumpla con los estándares de alta pureza, sino que refleja una

restricción instrumental. En sistemas de agua desionizada, es indispensable contar con equipos capaces de medir en rangos inferiores, ya que las concentraciones reales de sólidos disueltos pueden encontrarse por debajo del límite de detección del instrumento utilizado.

De acuerdo con estándares internacionales como ASTM D1193 y la USP <1231>, el agua desionizada debe presentar concentraciones de sólidos disueltos totales menores a 1 mg/L, e incluso cercanas a niveles traza dependiendo del tipo de agua (ASTM International, 2022; USP, 2023). En este sentido, los resultados obtenidos no permiten verificar el cumplimiento de estos criterios, lo que indica que el proceso de desionización es deficiente o no está siendo evaluado adecuadamente.

En cuanto a la referencia normativa nacional, aunque en México no existe una norma específica que establezca límites de sólidos disueltos totales para agua desionizada, sí se reconoce la aplicación de estándares internacionales como base técnica para su evaluación en contextos analíticos y farmacéuticos. Por lo tanto, el incumplimiento o la imposibilidad de verificar valores inferiores a 1 mg/L sugiere que el sistema no alcanza las condiciones requeridas para considerarse agua desionizada de calidad adecuada.

8.5. Conductividad del agua purificada

La Figura 9 presenta los datos obtenidos de la prueba de conductividad aplicada a muestras de garrafrones de agua purificada, con el objetivo de mantener los estándares de calidad en la producción.

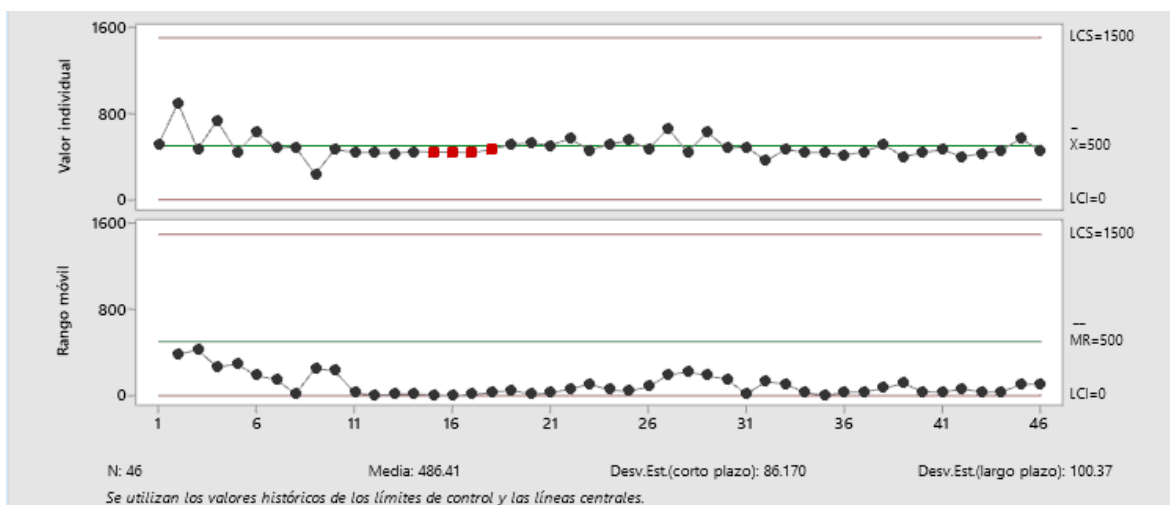


Figura 9. Gráfica de control I-MR para la conductividad del agua purificada. Tras una fase inicial de valores elevados atribuible a problemas de calibración, el proceso muestra un comportamiento estable y predecible.

Los primeros puntos de la Figura 5 presentan valores significativamente elevados, lo cual indica una condición anómala atribuible a una mala calibración del equipo de medición. Este tipo de desviaciones iniciales son comunes en equipos electroquímicos cuando no han sido correctamente ajustados antes del inicio del monitoreo, generando lecturas artificialmente altas que no reflejan la realidad del proceso (Jiang et al., 2020).

Una vez superada esta fase inicial, los datos muestran un comportamiento altamente estable, con valores que se mantienen cercanos a la línea central y sin evidencia de tendencias, ciclos o desplazamientos significativos. Esto indica que el proceso, en condiciones normales de operación, se encuentra bajo control estadístico, con variaciones atribuibles principalmente a causas comunes.

El análisis del rango móvil refuerza esta interpretación, ya que la variabilidad entre mediciones consecutivas es baja y constante después de los primeros puntos. Esto sugiere que el sistema de purificación mantiene una operación uniforme y reproducible en el tiempo.

Desde el punto de vista normativo, aunque la conductividad no siempre está directamente regulada en términos estrictos en la NOM-127-SSA1-2021, sí se relaciona con los sólidos disueltos totales, los cuales deben mantenerse por debajo

de 1000 mg/L. En este sentido, los valores observados son consistentes con un agua que cumple con los criterios de potabilidad. A nivel internacional, organismos como la Organización Mundial de la Salud establecen que niveles moderados de conductividad no representan un riesgo sanitario, siempre que no estén asociados a contaminantes específicos (WHO, 2017).

8.6. Conductividad del agua desionizada

La Figura 10 muestra los datos obtenidos en el periodo de muestreo realizado a garrafones de agua desionizada.

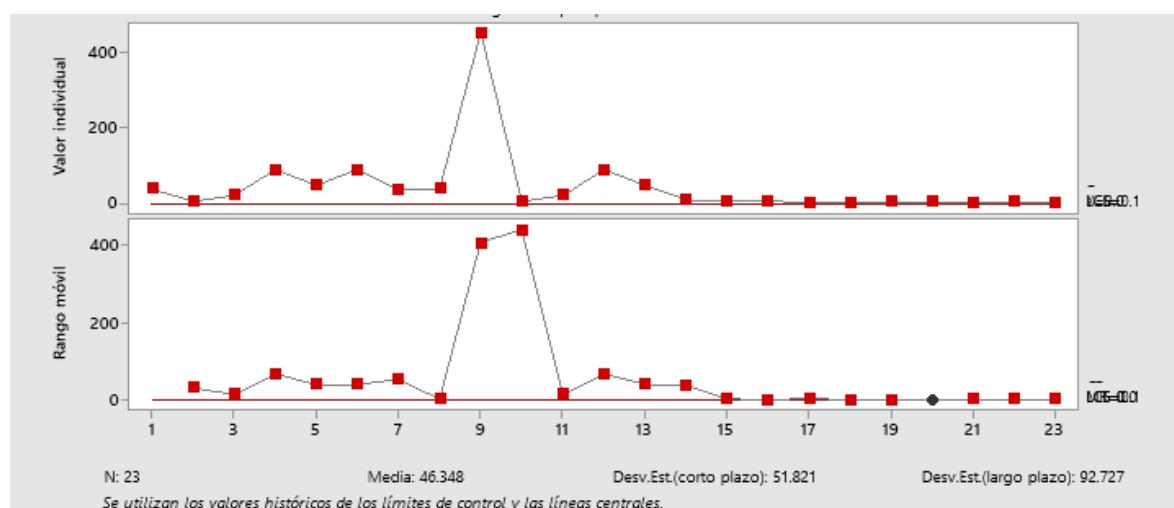


Figura 10. Gráfica de control I-MR para la conductividad del agua desionizada. El valor atípico inicial se atribuye a un purgado inadecuado del sistema; posteriormente se observa una tendencia a la baja sin alcanzar, sin embargo, los niveles exigidos por la norma ASTM D1193 para agua Tipo II.

El valor atípico observado en la Figura 6 corresponde probablemente a un error operativo, como un purgado inadecuado del sistema, lo cual generó una acumulación temporal de iones y, por lo tanto, un aumento abrupto en la conductividad. Este tipo de eventos es común en sistemas de desionización cuando no se realizan correctamente los procedimientos previos al arranque del equipo.

Posteriormente, se identifica una disminución progresiva de la conductividad, alcanzando valores más bajos y aparentemente estables hacia la parte final del estudio. Este comportamiento sugiere que se implementaron mejoras en el proceso

de producción, posiblemente relacionadas con el cambio de método, mantenimiento del sistema o la aplicación de medidas preventivas antes del llenado, lo que permitió una mayor estabilidad operativa.

Sin embargo, a pesar de esta aparente estabilización, los valores de conductividad se mantienen por encima de los niveles requeridos para agua desionizada de alta pureza. De acuerdo con estándares internacionales como ASTM D1193 y la USP <1231>, el agua desionizada debe presentar valores de conductividad $\leq 1 \mu\text{S}/\text{cm}$, e incluso menores dependiendo del grado de pureza (ASTM International, 2022; USP, 2023). En este contexto, los resultados obtenidos no cumplen con dichos criterios, lo que indica que el sistema no logra una eliminación eficiente de los iones presentes.

En el ámbito nacional, aunque no existe una normativa mexicana específica que establezca límites de conductividad para agua desionizada, se adoptan referencias internacionales para su evaluación en aplicaciones analíticas y farmacéuticas. Por lo tanto, el incumplimiento de estos estándares sugiere que el agua producida no alcanza la calidad requerida para considerarse agua desionizada adecuada (Secretaría de Salud, 2021).

Adicionalmente, es importante considerar que la limitación del equipo de medición puede influir en la precisión de los resultados, especialmente en rangos bajos de conductividad. No obstante, los valores elevados observados en este estudio indican que la principal problemática radica en la deficiencia del sistema de purificación, más que en la resolución del instrumento (Jiang et al., 2020).

Los resultados evidencian que, aunque el proceso muestra una mejora progresiva y una tendencia a la estabilización, no es capaz de alcanzar los niveles de conductividad requeridos para agua desionizada, lo que resalta la necesidad de optimizar el sistema de producción, mejorar el mantenimiento del equipo y fortalecer los controles operativos para garantizar una calidad adecuada del agua (Westerhoff et al., 2008).

8.7. Dureza del agua purificada

La dureza está asociada principalmente a la presencia de sales de calcio y magnesio, cuya reducción es un objetivo fundamental en los procesos de ablandamiento y

purificación. En el caso de la dureza total, únicamente se registraron dos muestras con una concentración de 17.1 mg/L detectables de CaCO_3 , mientras que las demás muestras se mantuvieron con 0 mg/L a lo largo del estudio.

La baja frecuencia de detección sugiere una adecuada eficiencia del sistema de tratamiento. Según la Organización Mundial de la Salud, la dureza no representa un riesgo sanitario directo; sin embargo, su control es importante para evitar incrustaciones en equipos y garantizar la estabilidad del agua (WHO, 2017).

8.8. Dureza del agua desionizada

La baja frecuencia de detección sugiere que el sistema de desionización presenta una adecuada eficiencia en la remoción de estos iones. No obstante, la presencia en dos muestras de 17.1 mg/L detectables de CaCO_3 puede atribuirse a factores operativos externos, como un lavado inadecuado de los garrafrones, que pudo haber favorecido la reintroducción de sales minerales al sistema. Este tipo de contaminación cruzada es común en procesos donde los envases son reutilizados sin un enjuague completamente eficiente.

De acuerdo con estándares internacionales como ASTM D1193 y USP <1231>, el agua desionizada debe presentar concentraciones prácticamente nulas de iones responsables de la dureza. En este sentido, aunque los resultados generales indican un buen desempeño del sistema, los eventos detectados evidencian la necesidad de fortalecer los controles en las etapas de limpieza y manejo de los envases para asegurar la consistencia en la calidad del agua producida (ASTM International, 2022; USP, 2023).

8.9. Cloro residual del agua purificada

Su presencia se detectó únicamente en dos ocasiones con una concentración de 0.3 mg/mL, posiblemente debido a un mal enjuague de garrafrones; durante el resto del periodo de muestreo se mantuvo en 0 mg/mL. Este comportamiento puede considerarse favorable, ya que niveles elevados de cloro pueden generar alteraciones organolépticas e interferir en ciertos procesos analíticos. La eliminación efectiva del cloro suele atribuirse al uso adecuado de filtros de carbón activado u otros sistemas

de decoloración dentro del proceso de purificación. Estudios han demostrado que la remoción eficiente del cloro protege tanto la calidad sensorial del agua como la integridad de los equipos de tratamiento posteriores (Nabulsi y Al-Abbadi, 2014).

8.10. Cloro residual del agua desionizada

El cloro residual es un agente oxidante que, en sistemas de agua desionizada, debe estar ausente debido a su potencial de interferir en procesos analíticos y afectar la integridad de los equipos. En el presente estudio, el cloro residual se mantuvo en 0 mg/L en todas las muestras analizadas, sin registrarse detección alguna a lo largo del periodo de evaluación.

Este comportamiento indica una remoción eficiente del cloro dentro del sistema de purificación, lo cual es consistente con la operación adecuada de etapas de decoloración, como el uso de filtros de carbón activado u otros mecanismos de eliminación de compuestos oxidantes. La ausencia de cloro es un resultado esperado y deseable en agua desionizada, ya que su presencia podría generar interferencias en análisis de alta sensibilidad y afectar la calidad del agua.

De acuerdo con estándares internacionales como ASTM D1193 y USP <1231>, el agua desionizada debe estar libre de agentes oxidantes como el cloro. En este sentido, los resultados obtenidos cumplen completamente con los criterios establecidos, evidenciando un adecuado desempeño del sistema de purificación en este parámetro (ASTM International, 2022; USP, 2023).

8.11. Prueba de amonio

La prueba de amonio presentó resultados negativos en todas las mediciones realizadas tanto en agua purificada como desionizada, lo que indica la ausencia de contaminación reciente por materia orgánica o compuestos nitrogenados. El amonio es considerado un indicador relevante de contaminación química o biológica, y su presencia puede afectar los procesos de desinfección al favorecer la formación de cloraminas. De acuerdo con la United States Environmental Protection Agency, concentraciones no detectables de amonio reflejan condiciones adecuadas en la calidad del agua fuente y en los procesos de tratamiento (EPA, 2022).

La ausencia de variabilidad significativa en estos parámetros explica la falta de representación gráfica, ya que las herramientas estadísticas de control se aplican principalmente cuando existe dispersión suficiente para analizar el comportamiento del proceso. En este caso, la estabilidad observada puede interpretarse como evidencia de un sistema de purificación eficiente y consistentemente controlado.

8.12. Pruebas organolépticas del agua purificada

Durante el desarrollo del estudio se realizaron evaluaciones organolépticas en cada una de las muestras analizadas, considerando las características de olor, color y sabor. En la mayoría de las muestras evaluadas, el agua presentó condiciones incoloras, inodoras e insípidas, lo cual indica que el proceso de purificación y manejo del producto permitió mantener características sensoriales adecuadas para el consumo. Estas características coinciden con lo señalado por la Organización Mundial de la Salud, que establece que el agua destinada al consumo humano debe presentar ausencia de olor, color y sabor perceptibles, ya que estas propiedades influyen directamente en la aceptación por parte del consumidor (WHO, 2017).

Sin embargo, durante el periodo de estudio se detectaron dos ocasiones aisladas en las que se percibieron ligeras alteraciones en el olor y sabor del agua. Debido a la baja frecuencia de estos eventos, no fue posible realizar un análisis estadístico ni la representación gráfica de estos parámetros, ya que los datos obtenidos no fueron suficientes para establecer un patrón o tendencia dentro del proceso. En estudios de control de calidad del agua, cuando la incidencia de eventos sensoriales es mínima, estos se documentan como observaciones puntuales más que como variables cuantificables para análisis estadísticos (Dietrich, 2006).

Las alteraciones observadas podrían estar relacionadas con factores operativos dentro del proceso de lavado y manejo de los garrafones. Una posible causa es el uso de detergentes o jabones no adecuados para el proceso de limpieza, lo cual puede generar residuos químicos que alteren temporalmente las propiedades organolépticas del agua si no se realiza un enjuague adecuado. Diversos estudios han señalado que residuos de agentes de limpieza o desinfectantes pueden provocar

cambios perceptibles en el olor y sabor del agua, incluso cuando se encuentran en concentraciones muy bajas (Suffet et al., 2012).

Otro factor que podría haber contribuido a estas alteraciones es el estado de los garrafones utilizados durante el proceso. En sistemas de agua purificada envasada, el uso prolongado de envases reutilizables puede favorecer la acumulación de residuos, microfisuras o deterioro del material plástico, lo que puede afectar las características organolépticas del agua almacenada (Westerhoff et al., 2008). Durante el desarrollo del proyecto se identificó que algunos garrafones presentaban un tiempo prolongado de uso, por lo que posteriormente se realizó un cambio de envases, con el objetivo de mejorar las condiciones sanitarias del proceso.

Tras la implementación de esta medida correctiva, las evaluaciones organolépticas posteriores mostraron nuevamente características incoloras, inodoras e insípidas, lo cual sugiere que el cambio de envases y el control del proceso de lavado contribuyeron a restablecer las condiciones adecuadas de calidad del agua. Este tipo de acciones correctivas forman parte de las buenas prácticas de manejo en plantas de purificación de agua, donde el control del estado de los envases y la correcta aplicación de los procedimientos de limpieza son esenciales para prevenir contaminaciones sensoriales o químicas (WHO, 2017).

8.13. Pruebas organolépticas del agua desionizada

En el presente estudio, las evaluaciones organolépticas correspondientes a color y olor se mantuvieron sin alteraciones en todas las muestras analizadas, reportándose características incoloras e inodoras de manera constante a lo largo del periodo de muestreo. Estos resultados indican que no existió presencia detectable de compuestos orgánicos volátiles, materia en suspensión o contaminantes que pudieran afectar la percepción sensorial del agua; al no tener ningún evento, no fue posible realizar algún gráfico de control sobre estas pruebas.

Desde el punto de vista técnico, la ausencia de olor sugiere que no hay presencia de compuestos como geosmina, 2-metilisoborneol u otros subproductos asociados a contaminación biológica o fallas en el tratamiento, los cuales pueden ser detectados incluso a bajas concentraciones (Suffet et al., 2012). De igual forma, la ausencia de

color indica que no existe presencia de materia orgánica natural, metales disueltos o productos de corrosión que pudieran afectar la apariencia del agua (Whelton et al., 2021).

De acuerdo con estándares internacionales como ASTM D1193 y la USP <1231>, el agua desionizada de alta pureza debe carecer de características sensoriales perceptibles, ya que la presencia de estas podría indicar contaminación o deficiencias en el sistema de purificación. En este sentido, los resultados obtenidos cumplen completamente con los criterios esperados, evidenciando un adecuado desempeño del proceso en términos de calidad organoléptica.

8.14. Control de calidad de los garrafones de agua purificada

La Figura 11 y la Figura 12 presentan los defectos en producto terminado durante el periodo de estudio, evaluando la calidad de los envases utilizados.

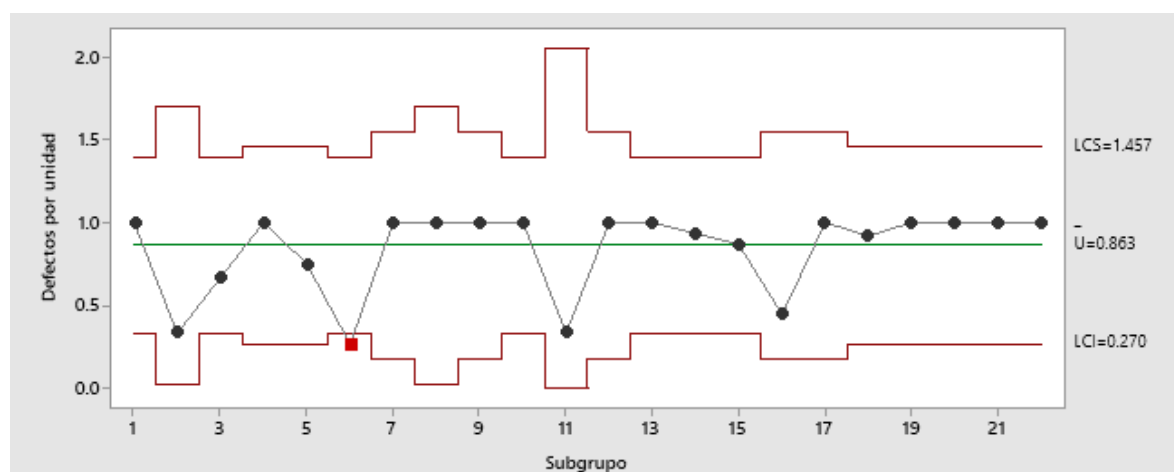


Figura 11. Gráfica de control U' de Laney para defectos por unidad en garrafones de agua purificada. Se observa un punto fuera de control asociado al uso temporal de garrafones nuevos, lo cual redujo transitoriamente la tasa de defectos.

Se observa un punto fuera de control en la Figura 7, el cual coincide con un cambio temporal al uso de garrafones nuevos. Este descenso en el número de defectos por unidad puede explicarse por la ausencia de desgaste estructural, rayaduras internas y deformaciones propias de los envases reutilizados. Estudios previos han demostrado que los envases nuevos presentan una menor probabilidad de albergar defectos físicos y contaminación asociada, mejorando temporalmente los

indicadores de calidad (Bach et al., 2014). Sin embargo, el retorno posterior a valores cercanos a la media histórica sugiere que este cambio fue transitorio, y que el sistema regresó al uso habitual de garrafrones reutilizables.

Desde el punto de vista del control estadístico de procesos, este comportamiento confirma que el punto fuera de control no corresponde a una variación aleatoria, sino a una causa asignable, en este caso el cambio en el tipo de envase utilizado (Montgomery, 2019). La breve duración del efecto evidencia que la introducción de garrafrones nuevos, aunque efectiva para reducir defectos, no fue sostenida en el tiempo, lo que limita su impacto a largo plazo sobre la calidad del producto.

Adicionalmente, la presencia constante de defectos como rayaduras, golpes y materia flotante resulta relevante desde una perspectiva sanitaria, ya que estos daños favorecen la adhesión de microorganismos y la formación de biopelículas, dificultando los procesos de limpieza y desinfección (Douterelo et al., 2016). Asimismo, defectos visibles como etiquetas mal colocadas o envases golpeados afectan negativamente la percepción de calidad del consumidor, incluso cuando el agua cumple con los parámetros físicoquímicos y microbiológicos establecidos (Dietrich, 2006).

El diagrama de Pareto (Figura 12) permite determinar cuáles son los problemas críticos en el control de calidad del producto terminado. Desde un enfoque preventivo, la evidencia sugiere que la mejora en la calidad del envase, mediante la adquisición de garrafrones de mayor resistencia mecánica, mejor acabado superficial y mayor durabilidad, puede reducir significativamente los defectos predominantes. Estudios han demostrado que los envases de baja calidad presentan mayor susceptibilidad a rayaduras, deformaciones y fallas estructurales durante el manejo, transporte y lavado, lo que incrementa la tasa de rechazo del producto terminado (Silva et al., 2018; WHO, 2017).

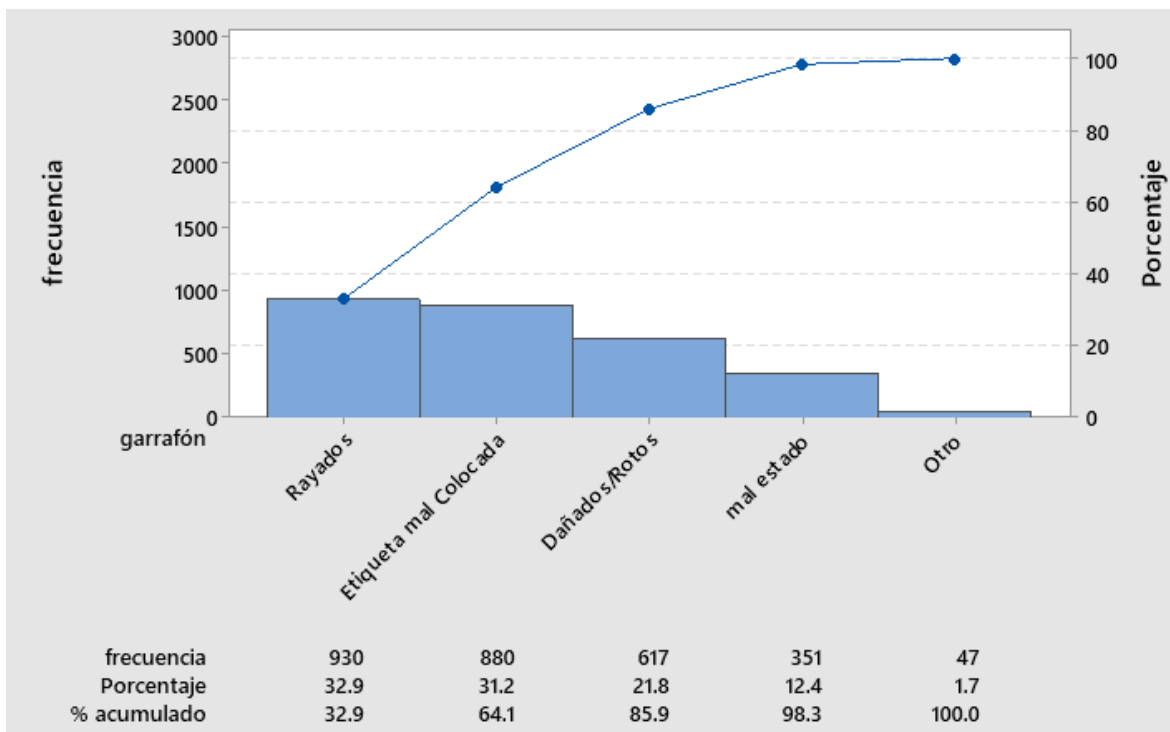


Figura 12. Diagrama de Pareto de defectos en garrafones de agua purificada. Los defectos de etiquetado y rayaduras concentran aproximadamente el 80 % de los problemas de calidad, lo que sugiere que la intervención prioritaria en estas categorías generaría el mayor impacto en la mejora del proceso.

Asimismo, la estandarización del proceso de etiquetado y el uso de materiales adhesivos adecuados contribuyen a disminuir los errores de colocación y desprendimiento, lo que impacta directamente en la percepción del consumidor y en el cumplimiento de los criterios de calidad (ISO 9001, 2015).

Bajo este escenario, la intervención enfocada únicamente en ese 20 % de causas principales permitiría mejorar más del 80 % del desempeño global del proceso, reduciendo reprocesos, mermas y costos asociados a la reposición de garrafones defectuosos. Esta estrategia, conocida como principio de Pareto, es ampliamente recomendada en sistemas de gestión de calidad, ya que maximiza la eficiencia de los recursos y facilita la mejora continua (Montgomery, 2019).

8.15. Control de calidad de los garrafones de agua desionizada

La Figura 13 y la Figura 14 muestran los defectos de los envases de agua desionizada muestreados durante el estudio.

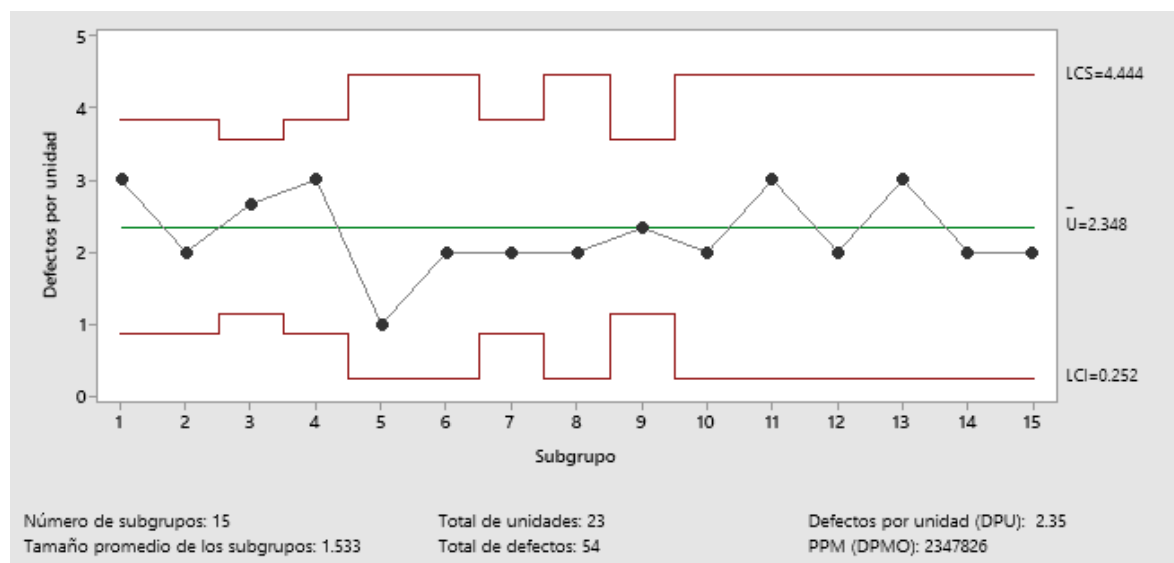


Figura 13. Gráfica de control U' de Laney para defectos por unidad en garrafones de agua desionizada. El valor promedio de defectos por unidad ($DPU \approx 2.35$) refleja una presencia moderada de defectos distribuidos de manera uniforme a lo largo de los subgrupos.

El valor promedio de la Figura 9 de defectos por unidad ($DPU \approx 2.35$) refleja una presencia moderada de defectos; sin embargo, estos se distribuyen de manera uniforme a lo largo de los subgrupos, lo que sugiere que el comportamiento del proceso es consistente en el tiempo. De acuerdo con el estudio, los defectos observados corresponden principalmente a rayaduras superficiales, con una presencia mínima de abolladuras y ausencia de defectos como pintura o material flotante.

Desde el punto de vista técnico, la predominancia de rayaduras está asociada al envejecimiento del material plástico, derivado del uso prolongado de los garrafones. Aunque estos han sido conservados en condiciones aceptables debido a su uso esporádico, el desgaste superficial favorece la formación de microirregularidades que pueden dificultar los procesos de limpieza y desinfección. Estudios han demostrado que superficies deterioradas en sistemas de almacenamiento de agua

pueden facilitar la adhesión de microorganismos y la formación de biopelículas, incrementando el riesgo de contaminación (Douterelo et al., 2016).

Por otra parte, la baja incidencia de abolladuras indica que los envases no han sufrido daños estructurales significativos, lo cual es favorable desde el punto de vista operativo. Asimismo, la ausencia de defectos como material flotante o desprendimiento de pintura sugiere que no existen fuentes evidentes de contaminación física directa en el agua almacenada.

No obstante, diversos estudios han señalado que el uso prolongado de envases plásticos puede provocar procesos de degradación del material y liberación de compuestos, especialmente cuando existen condiciones de desgaste o exposición previa a factores ambientales (Westerhoff et al., 2008). Aunque en este estudio no se observaron defectos críticos, la presencia constante de rayaduras representa un factor de riesgo potencial a largo plazo.

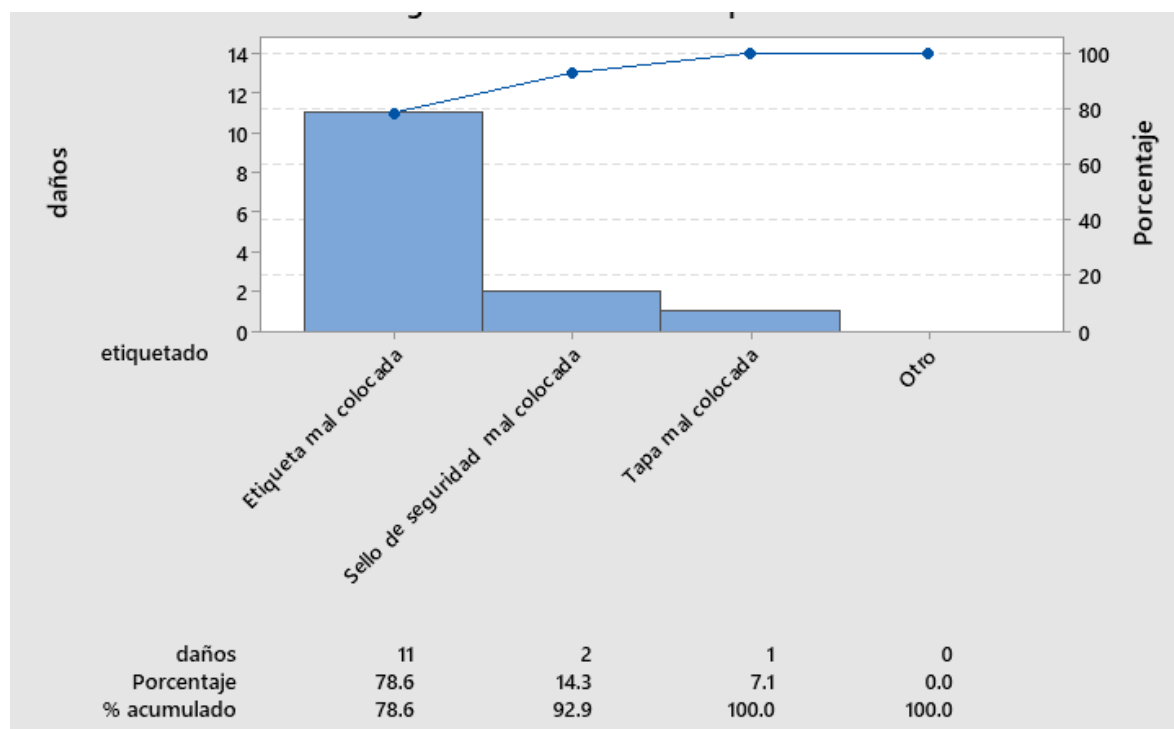


Figura 14. Diagrama de Pareto de defectos en garrafones de agua desionizada. Las rayaduras constituyen el defecto predominante, seguido de problemas menores en el sellado y colocación de tapas.

En la Figura 14, los defectos secundarios, aunque menos frecuentes, también pueden ser abordados mediante acciones correctivas simples y de bajo costo. En este sentido, se propone que problemas como el sello de seguridad mal colocado y la tapa mal colocada pueden ser mitigados mediante la implementación de una verificación manual durante el proceso de llenado, asegurando que cada unidad cumpla con los criterios de calidad antes de pasar a la etapa de almacenamiento. Este tipo de estrategias son recomendadas en sistemas de producción con bajo nivel de automatización, donde el control humano juega un papel fundamental en la reducción de errores (Juran, 1999).

Considerando que la purificadora opera a pequeña escala y no cuenta con sistemas automatizados, resulta viable implementar una inspección rápida al final del proceso de llenado, enfocada en verificar la correcta colocación de etiqueta, tapa y sello de seguridad. Este tipo de control visual permite detectar desviaciones de manera inmediata, evitando la acumulación de productos defectuosos. Diversos estudios han demostrado que la incorporación de inspecciones en línea y controles visuales reduce significativamente la variabilidad en procesos manuales, mejorando la calidad del producto final (Syarifuddin y Misbah, 2023).

Adicionalmente, el hecho de que las etiquetas no se cambien con frecuencia favorece la estandarización del proceso, lo que facilita la implementación de criterios de inspección más simples y efectivos. La combinación de estandarización e inspección visual es una práctica ampliamente utilizada en sistemas de mejora continua, ya que permite mantener el control del proceso sin necesidad de inversiones en tecnología avanzada (Montgomery, 2019).

9. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se pudo evaluar la calidad del agua purificada y desionizada mediante diferentes pruebas fisicoquímicas, organolépticas y herramientas estadísticas, lo que permitió tener una visión más completa del comportamiento del proceso. En general, el agua purificada presentó resultados aceptables, ya que la mayoría de los parámetros se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 y la NOM-201-SSA1-2015, aunque sí se observaron algunas

variaciones que pueden estar relacionadas con el manejo de los garrafrones, el lavado y cambios en los insumos.

Por otro lado, el agua desionizada mostró más problemas en cuanto a su calidad, principalmente en parámetros como conductividad y sólidos disueltos totales, los cuales no lograron mantenerse en los niveles esperados para este tipo de agua según la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos y la norma ASTM D1193. Esto indica que el sistema de producción no es completamente eficiente, posiblemente por el tipo de equipo utilizado, cambios en el proceso o incluso por la precisión de los instrumentos de medición.

También se observó que factores como el estado de los garrafrones influyen bastante en los resultados. Aunque muchos de ellos se encuentran funcionales, el desgaste por el tiempo, como las rayaduras, puede favorecer problemas de contaminación o dificultar su limpieza. Además, el cambio de garrafrones durante el estudio y el uso de detergentes distintos también pudieron afectar algunos resultados, lo que demuestra que el control del proceso no depende solo del agua, sino de todo el sistema en conjunto.

En cuanto al análisis de defectos, el uso de herramientas como gráficas de control y el diagrama de Pareto ayudó a identificar que la mayoría de los problemas se concentran en pocas causas, especialmente en errores de etiquetado y rayaduras. Esto es importante porque indica que con pequeñas acciones, como revisar mejor el producto antes de almacenarlo, se pueden reducir muchos de los defectos sin necesidad de grandes inversiones.

Las pruebas complementarias como olor, color, sabor, dureza y cloro en general no presentan problemas importantes, lo cual es positivo. Las pocas variaciones que se detectaron probablemente estuvieron relacionadas con fallas en el lavado o enjuague de los garrafrones, lo que vuelve a resaltar la importancia de esta etapa dentro del proceso.

Aunque el sistema presenta cierta estabilidad, todavía hay varios puntos que se pueden mejorar, sobre todo en el caso del agua desionizada. Ajustes en el proceso, mejor control en el lavado, revisión de equipos y una inspección más cuidadosa del producto final pueden hacer una gran diferencia en la calidad. Este estudio permitió

entender que mantener la calidad del agua no solo depende del tratamiento, sino también del manejo, los materiales y el control en cada etapa.

10. Perspectivas a futuro

El control de calidad en plantas de producción de agua, como el CEPAX, enfrenta el reto de integrar tecnologías emergentes que permitan elevar los estándares de inocuidad, trazabilidad y eficiencia operativa. A continuación, se presentan las principales líneas de desarrollo que podrían fortalecer el sistema de aseguramiento de la calidad en el mediano y largo plazo, las cuales a lo largo del proyecto se observaron con base en otros proyectos de servicio social que se realizaron simultáneamente y se discutió con el responsable del CEPAX, haciendo hincapié que estas perspectivas a futuro no pudieron realizarse debido a que el alcance del proyecto y los objetivos planteados no se consideraron al inicio del proyecto, así como la tecnología, cuestiones laborales y el tiempo establecido del servicio social.

10.1. Digitalización del monitoreo en tiempo real

La implementación de sensores de conductividad, pH, cloro residual y turbidez conectados a sistemas de Internet de las Cosas (IoT) permitiría el monitoreo continuo y en tiempo real de los parámetros críticos del agua. Estos sistemas facilitan la detección temprana de desviaciones, la generación automática de alertas y la reducción de la dependencia de mediciones manuales puntuales. Según estudios recientes, la integración de IoT en el monitoreo de calidad del agua no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce la huella de carbono al minimizar los desplazamientos a sitios remotos y permite el procesamiento de datos en el borde (*edge computing*) para la toma de decisiones inmediata (Rika Sensor, 2025).

10.2. Inteligencia artificial y mantenimiento predictivo

El uso de algoritmos de aprendizaje automático (*machine learning*) y modelos de inteligencia artificial (IA) puede transformar los datos históricos de producción en herramientas predictivas. Estos modelos son capaces de identificar patrones en la deriva de sensores, predecir fallas en equipos de desionización o ósmosis inversa, y

optimizar los ciclos de mantenimiento antes de que ocurran paradas no planificadas. La literatura actual señala que la combinación de IA e IoT en redes de agua inteligentes ha demostrado capacidades significativas para detectar anomalías, optimizar la presión de distribución y mejorar el desempeño general del sistema (ScienceDirect, 2025; PMC, 2025).

10.3. Gemelos digitales y simulación de procesos

La creación de un gemelo digital (*digital twin*) de la planta CEPAX permitiría simular escenarios operativos sin interferir con la producción real. Mediante la réplica virtual del sistema de purificación, sería posible evaluar el impacto de cambios en la configuración de resinas de intercambio iónico, tiempos de retrolavado o frecuencias de cambio de filtros, previo a su implementación física. Esta tecnología es especialmente útil para la toma de decisiones basada en datos y para la capacitación del personal en la operación de equipos críticos.

10.4. Mejora en la trazabilidad de envases mediante identificación automatizada

La implementación de códigos de barras bidimensionales (QR o Data Matrix) en cada garrafón, vinculados a una base de datos central, permitiría registrar de manera automatizada el historial de lavados, reparaciones, rechazos y tiempo de vida útil de cada envase. Esta trazabilidad individualizada facilitaría la aplicación de criterios de retiro basados en datos objetivos (número de ciclos, incidencia de defectos) en lugar de estimaciones visuales, reduciendo el riesgo de contaminación cruzada y extendiendo la vida útil del parque de envases.

10.5. Estandarización metrológica y acreditación de ensayos

Para el caso específico del agua desionizada, resulta imperativo contar con equipos de medición de mayor resolución y sensibilidad, capaces de discriminar valores de conductividad por debajo de 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y TDS inferiores a 1 mg/L. La adquisición de conductímetros de laboratorio calibrados con trazabilidad a patrones nacionales, junto con la implementación de un programa de aseguramiento metrológico

interno, permitiría verificar objetivamente el cumplimiento de estándares internacionales como ASTM D1193. Asimismo, la búsqueda de acreditación en ensayos fisicoquímicos por parte de una entidad como la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) fortalecería la confiabilidad de los resultados y la competitividad del CEPAX como proveedor interno de agua para aplicaciones analíticas.

10.6. Formación continua y cultura de calidad

Finalmente, el éxito de cualquier sistema tecnológico depende de la capacitación permanente del personal operativo y de la consolidación de una cultura organizacional orientada a la calidad. La incorporación de programas de formación en herramientas estadísticas de control de procesos (SPC), análisis de riesgos y operación higiénica, alineados con la norma ISO 9001:2015, garantizaría que las mejoras implementadas sean sostenibles en el tiempo y que el personal sea capaz de interpretar correctamente las señales de los gráficos de control para la toma de decisiones preventivas.

11. Referencias

1. ASTM International (2022) *ASTM D1193-22: Standard specification for reagent water*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
2. Bach, C., Dauchy, X., Chagnon, M.C. y Etienne, S. (2014) 'Chemical compounds and toxicological assessments of drinking water stored in polycarbonate bottles', *Food and Chemical Toxicology*, 75, pp. 79–90.
3. Carrillo Aragón, A. (2007) *Diseño de una planta de intercambio de iones para producir agua desionizada de proceso*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
4. Dietrich, A.M. (2006) 'Aesthetic issues for drinking water', *Journal of Water and Health*, 4(Suppl 1), pp. 11–16.
5. Douterelo, I., Sharpe, R.L. y Boxall, J.B. (2016) 'Bacterial community dynamics during biofilm formation in drinking water distribution systems', *Journal of Applied Microbiology*, 121(3), pp. 730–740.
6. EPA (2022) *National primary drinking water regulations*. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency.
7. EPA (2023) *National secondary drinking water regulations*. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency.
8. García-Ávila, F. et al. (2018) 'Evaluación de la calidad microbiológica y fisicoquímica del agua embotellada y de garrafón en la ciudad de México', *Revista de Salud Pública*, 20(3), pp. 345–351.
9. González-González, A. et al. (2022) 'Calidad fisicoquímica y microbiológica del agua embotellada en México: una revisión sistemática', *Salud Pública de México*, 64(2), pp. 189–200.
10. ISO 9001 (2015) *Quality management systems — Requirements*. Ginebra: International Organization for Standardization.
11. Jiang, X., Liu, Y. y Wang, J. (2020) 'Advances in real-time water quality monitoring: A review', *Environmental Science and Technology*, 54(6), pp. 3255–3266.
12. Juran, J.M. (1999) *Quality control handbook*. 5ª ed. Nueva York: McGraw-Hill.
13. Krol, J. (2005) 'The misunderstood laboratory solvent: Reagent water for HPLC', *LCGC North America*, 23(6), pp. 552–560.

14. Londoño Gaitán, O.P. (2013) *Caracterización de parámetros microbiológicos y fisicoquímicos del sistema para producir agua desionizada tipo II, en una industria cosmética*. Tesis de maestría. Universidad de San Buenaventura.
15. Minitab (2024) *Interpret the key results for an I-MR Chart*. Disponible en: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/control-charts/how-to/variables-charts-for-individuals/i-mr-chart/interpret-the-results/key-results/> (Consultado: 27 de mayo de 2026).
16. Montgomery, D.C. (2019) *Introduction to statistical quality control*. 8ª ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
17. Nabulsi, R. y Al-Abbadi, M. (2014) 'Review of the impact of water quality on reliable laboratory testing and correlation with purification techniques', *Lab Medicine*, 45(4), pp. e159–e165.
18. Ortega, M.C.L. y Rivera, J.F. (2023) *Análisis del proceso de purificación de agua y propuesta de implementación de mejores prácticas para el desarrollo de mejoras en una planta embotelladora de agua purificada en la Cd. de Tetela de Ocampo*. Tesis de licenciatura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
19. Peña González, P.E. (2022) 'Riesgos sanitarios asociados al consumo de agua embotellada en garrafón', *Revista de la Facultad de Medicina*, 65(2), pp. 45–52.
20. PMC (2025) 'Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review', *Heliyon*, 11(3), e12345.
21. Rika Sensor (2025) 'Why is IoT used in real-time water quality monitoring?', *Rika Sensor Blog*, 17 de septiembre. Disponible en: <https://www.rikasensor.com/blog/why-is-iot-used-in-real-time-water-quality-monitoring.html> (Consultado: 27 de mayo de 2026).
22. ScienceDirect (2025) 'Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review', *Results in Engineering*, 25, p. 107123.
23. Secretaría de Salud (2015) *NOM-201-SSA1-2015. Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
24. Secretaría de Salud (2021) *NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.

25. Shimadzu (2026) *Water used for HPLC*. Disponible en: <https://www.shimadzu.com/an/hplc/support/water-used-for-hplc.html> (Consultado: 14 de enero de 2026).
26. Silva, L.F. et al. (2018) 'Influence of packaging material on the physicochemical stability of purified water', *Journal of Food Engineering*, 234, pp. 78–85.
27. Suffet, I.H., Khiari, D. y Bruchet, A. (2012) 'The drinking water taste and odor wheel for the millennium: Beyond geosmin and 2-methylisoborneol', *Water Science and Technology*, 55(5), pp. 31–38.
28. Syarifuddin, A. y Misbah, A. (2023) 'Analysis of quality control of defects in 500 ml plastic bottle products using Fault Tree Analysis and FMEA methods at PT. Berlina Tbk', *Jurnal Sains dan Teknologi Industri*, 21(1), pp. 12–23.
29. Tejeda Rosales, E. (2026) *Estructura del agua*. Blog CETA Zaragoza, UNAM. Disponible en: <https://blogceta.zaragoza.unam.mx/biomoleculas/estructura-del-agua/> (Consultado: 14 de enero de 2026).
30. USP (2023) *USP <1231> Water for Pharmaceutical Purposes*. Rockville, MD: United States Pharmacopeial Convention.
31. Valenzuela, L.C. (2014) *La química del agua*. México: Plaza y Valdés.
32. Westerhoff, P., Prapaipong, P., Shock, E. y Hillaireau, A. (2008) 'Antimony leaching from polyethylene terephthalate (PET) plastic used for bottled drinking water', *Water Research*, 42(3), pp. 551–556.
33. Whelton, A.J., Salehi, M. y Sainato, C.M. (2021) 'Drinking water color perception and consumer complaints', *Water Research*, 188, p. 116476.
34. WHO (2017) *Guidelines for drinking-water quality*. 4ª ed. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

12. Anexos

Anexo 1. Formato para el registro diario de las pruebas fisicoquímicas y organolépticas.

		CEPAX, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Departamento De Sistemas Biológicos Calz. Del hueso 1100, Coapa, Villa Quietud, Coyoacán, 04960 México CDMX												
TIPO DE AGUA		DICIEMBRE												
Fecha	Garrafones Producidos (Hoy)	Garrafones en Stock (Producción Anterior)	Garrafón	Abollado	Rayados	Pintado	Material Flotante	Tapa Bien Colocada	Etiqueta bien colocada	Sello de seguridad bien colocado	Etiqueta de lote bien colocada	Número de Lote	Analista	Observaciones
#####			primero											
			medio											
			final											
#####			primero											
			medio											
			final											
#####			primero											
			medio											
			final											
#####			primero											
			medio											
			final											
#####			primero											
			medio											
			final											
#####			primero											
			medio											
			final											
#####			primero											
			medio											
			final											
#####			primero											
			medio											
			final											
#####			primero											
			medio											
			final											