

**LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y
Humanidades, Asunción, Paraguay**

ISSN en línea: 2789-3855, 2026

Estandarización operativa y decisiones dinámicas en el suministro hídrico: un enfoque de ingeniería de calidad a microescala

Operational standardization and dynamic decisions in water supply:
a quality engineering approach at microscale

Carlos Omar Palma Urzúa

m23680023@cuautla.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8585-5862>

Instituto Tecnológico de Cuautla
Cuautla – México

Omar Oswaldo Torres Fernández

omar.torres@cuautla.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0003-5919-7688>

Instituto Tecnológico de Cuautla
Cuautla – México

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i3.6141>


Redilat
Red de Investigadores
Latinoamericanos



Revista Latinoamericana de
Ciencias Sociales y Humanidades

Artículo recibido: 25 de febrero de 2026.
Aceptado para publicación: 09 de julio de 2026.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

VOLUMEN VII

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i3.6141>

Estandarización operativa y decisiones dinámicas en el suministro hídrico: un enfoque de ingeniería de calidad a microescala

Operational standardization and dynamic decisions in water supply: a quality engineering approach at microscale

Carlos Omar Palma Urzúa

m23680023@cuautila.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8585-5862>

Instituto Tecnológico de Cuautla

Cuautla – México

Omar Oswaldo Torres Fernández

omar.torres@cuautila.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0003-5919-7688>

Instituto Tecnológico de Cuautla

Cuautla – México

Artículo recibido: 19 de febrero de 2026. Aceptado para publicación: 03 de julio de 2026.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

El aseguramiento de la calidad y la estandarización operativa son fundamentales en la economía circular a microescala para coordinar recursos inter-empresariales. El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo de estandarización de procesos basado en ingeniería de calidad y gestión visual para el control y la trazabilidad físico-química del efluente de rechazo de una planta purificadora en Cuautla, Morelos, reutilizado en una lavandería colindante. Metodológicamente, la investigación adopta un enfoque cuantitativo, descriptivo-prospectivo y no experimental de campo, estructurado en formatos de registro diario y una matriz de control operativo semaforizada que gobierna visualmente válvulas de compuerta por gravedad. Los resultados del modelado determinista demuestran que ante desviaciones analíticas de Sólidos Disueltos Totales superiores a 500 ppm (>150 mg/L de dureza), el instrumento guía paramétricamente al operador a transicionar de la mezcla base 70/30 a relaciones de mitigación de 60/40 o 50/50, disminuyendo la concentración iónica y previniendo incrustaciones calcáreas. Bajo condiciones nominales, el sistema permite un ahorro potencial de 210 litros de agua potable por ciclo de 300 litros, proyectando que el nodo receptor puede absorber el 100% del desecho anual (113,400 litros) al consolidar el 30% de la capacidad instalada de la purificadora, mitigando la extracción de la red pública en el estiaje. Se concluye que la estandarización operativa en el Gemba dota a las micro-organizaciones de un marco administrativo adaptativo, de bajo costo (Low-CapEx) y resiliente, alineando el control de calidad con la sustentabilidad hídrica regional.

Palabras clave: estandarización operativa, ingeniería de calidad, gestión visual, ósmosis inversa, sustentabilidad hídrica

Abstract

Quality assurance and operational standardization are essential in microscale circular economy to coordinate inter-firm resources. The objective of this study is to develop a process standardization model based on quality engineering and visual management for the control and physicochemical

traceability of reverse osmosis reject water from a purification plant in Cuautla, Morelos, reused in an adjacent laundry. Methodologically, the research adopts a quantitative, descriptive-prospective, and non-experimental field approach, structured into daily logs and a color-coded operational control matrix that visually governs gravity-fed gate valves. The results of the deterministic modeling demonstrate that in the event of analytical deviations of Total Dissolved Solids above 500 ppm (>150 mg/L of total hardness), the instrument parametrically guides the operator to transition from the 70/30 baseline blend to 60/40 or 50/50 mitigation ratios, decreasing ionic concentration and preventing scale damage. Under nominal conditions, the system enables a potential savings of 210 liters of drinking water per 300-liter cycle, projecting that the receiving node can absorb 100% of the annual waste (113,400 liters) by consolidating 30% of the purifier's installed capacity, mitigating public grid extraction during dry seasons. It is concluded that operational standardization in the Gemba endows micro-organizations with an adaptive, low-cost (Low-CapEx), and resilient administrative framework, aligning quality control with regional water sustainability.

Keywords: operational standardization, quality engineering, visual management, reverse osmosis, water sustainability

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons. 

Cómo citar: Palma Urzúa, C. O., & Torres Fernández, O. O. (2026). Estandarización operativa y decisiones dinámicas en el suministro hídrico: un enfoque de ingeniería de calidad a microescala. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 7 (3), 2711 – 2723.
<https://doi.org/10.56712/latam.v7i3.6141>

INTRODUCCIÓN

La transición de un modelo lineal de manufactura hacia un esquema de circuito cerrado inter-empresarial, el cual se fundamenta en el paradigma emergente de la economía circular (Geissdoerfer et al., 2017), requiere de un riguroso andamiaje administrativo que garantice la estabilidad, predictibilidad y calidad de las corrientes materiales compartidas (Krajewski et al., 2013). En el contexto de la administración de operaciones contemporánea, la gestión del recurso hídrico ha dejado de considerarse un simple insumo periférico para convertirse en una variable estratégica condicionada por el estrés hídrico global y las presiones regulatorias en materia de sustentabilidad organizacional (Schroeder et al., 2011). No obstante, la implementación práctica de proyectos de simbiosis industrial a pequeña escala se enfrenta sistemáticamente a la barrera de la variabilidad operativa, un desafío crítico que restringe la adopción de modelos circulares en pequeñas y medianas empresas de la región latinoamericana (Sabatino, 2022); este fenómeno compromete la calidad del producto final y la integridad de los activos fijos si no se controla adecuadamente en el lugar de trabajo o Gemba, el cual alude al espacio real donde ocurren las operaciones y se genera el valor directo (Evans & Lindsay, 2015)."

La problemática central que motiva este estudio radica en la inherente variabilidad físico-química de los efluentes comerciales marginales, específicamente el agua de rechazo proveniente de los sistemas de purificación por ósmosis inversa utilizados en la producción de agua purificada para consumo humano en presentación de garrafones. En estos establecimientos, para garantizar la idoneidad del producto final según los estándares alimentarios, las membranas de alta presión separan el agua producto del efluente concentrado, enviando tradicionalmente este último de manera directa al drenaje municipal. Este descarte ignora el potencial de circularidad de las corrientes secundarias bajo marcos normativos ambientales locales, los cuales regulan la calidad mínima para el contacto con servicios públicos e industriales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 1997), agravando las deficiencias regulatorias y operativas en la gestión del recurso hídrico que caracterizan al sector industrial de Cuautla (Pineda, 2023). Investigaciones previas, incluyendo el análisis de viabilidad técnica antecedente de este nodo inter-empresarial (Palma, en prensa), demostraron que dicho efluente marginal es químicamente apto para su reúso en lavanderías comerciales mediante una mezcla base nominal de 70% agua de rechazo y 30% agua de la red pública.

Sin embargo, en la práctica cotidiana, la falta de estandarización en el monitoreo diario genera un riesgo crítico en la administración de operaciones. Si las propiedades de las fuentes de agua fluctúan sin un control estricto, se altera el balance óptimo del suministro, provocando incrustaciones calcáreas debido a la dureza iónica excesiva o inestabilidad en la dosificación de insumos químicos en las lavadoras operativas (Montgomery, 2020). La precipitación de carbonatos de calcio y magnesio no solo reduce la eficiencia de los tensoactivos, cortando el detergente y desgastando prematuramente las fibras textiles, sino que genera capas aislantes en las resistencias térmicas de las maquinarias, elevando los costos de mantenimiento y el consumo energético (Gutiérrez, 2014). Por consiguiente, para mitigar esta variabilidad sin incurrir en infraestructuras costosas, se requiere un modelo capaz de dinamizar las relaciones de mezcla en tiempo real, transitando de manera segura desde escenarios de optimización analítica absoluta (100% efluente) hasta márgenes restrictivos de mitigación (50% efluente / 50% red pública) en función de las lecturas analíticas instantáneas.

Por el motivo anterior, el objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo operativo de estandarización hídrica fundamentado en herramientas clásicas de ingeniería de calidad (Ishikawa, 1986; Deming, 1989), centrado en el monitoreo sistemático de los Sólidos Disueltos Totales (TDS) mediante el diseño de formatos de registro diario activos y una matriz de decisiones dinámicas basada en códigos de color. Este sistema busca guiar de manera paramétrica y visual al operador en la dosificación de las mezclas volumétricas por gravedad. Con ello, se preserva la integridad de la infraestructura técnica en

la unidad de lavado y se aseguran las propiedades estéticas e higiénicas de las prendas textiles procesadas, mediante un esquema de control operativo de bajo costo de inversión (Low-CapEx). A través de este enfoque, se pretende demostrar que la ingeniería de calidad aplicada a microescala puede actuar como un puente efectivo entre la viabilidad científica de laboratorio y la sostenibilidad operativa real en los entornos de servicios en América Latina.

METODOLOGÍA

Enfoque de Investigación

La presente investigación adoptó un enfoque cuantitativo. De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), el enfoque cuantitativo se fundamenta en la recolección de datos empíricos y medibles para probar hipótesis o evaluar el comportamiento de variables mediante el uso de magnitudes numéricas y herramientas estadísticas. En este estudio, el enfoque cuantitativo permitió registrar, tabular y analizar estadísticamente las fluctuaciones continuas de las variables físico-químicas del efluente marginal, garantizando la objetividad y la reproducibilidad del control estadístico de procesos (SPC) implementado (Montgomery, 2020).

Diseño del Estudio

El diseño de la investigación se tipificó como no experimental, de corte transversal y de nivel descriptivo-prospectivo. Gutiérrez (2014) señala que la investigación de campo de carácter no experimental consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular deliberadamente las variables independientes, sino registrando el comportamiento del entorno en el sitio de trabajo o Gemba. El estudio posee un alcance descriptivo debido a que se detallan minuciosamente las características estructurales y operativas de los instrumentos de gestión hídrica, y es de carácter prospectivo porque las restricciones analíticas recopiladas sirvieron como base matemática para modelar escenarios futuros de balance de masa en función de la capacidad instalada y la demanda proyectada del sistema productivo coordinado (Krajewski et al., 2013).

Participantes

En el contexto de la ingeniería de operaciones y la ecología industrial, las unidades de análisis o participantes del ecosistema no corresponden a sujetos humanos bajo un muestreo social convencional, sino a los nodos operativos e infraestructuras interconectadas que integran el sistema de simbiosis industrial (Schroeder et al., 2011). Los componentes de este nodo coordinado se seleccionaron mediante un muestreo intencional basado en criterios de conveniencia geográfica y viabilidad técnica de flujo; en consecuencia, el modelo quedó integrado, en primer lugar, por el nodo proveedor, constituido por una planta purificadora de agua potable comercial dedicada a la producción y venta de agua purificada para consumo humano en presentación de garrafones de 20 litros; en segundo lugar, por el nodo receptor, conformado por una unidad de lavado textil comercial colindante cuya demanda se ha establecido bajo una base nominal aproximada de 300 litros por ciclo de operación pesada. Este parámetro, que se alinea con los perfiles de consumo y las estrategias de conservación hídrica documentadas para instalaciones de lavado comercial (Barker & Smith, 2019), constituye una constante de diseño hidrodinámico en ingeniería de servicios calculada de forma agregada a partir del consumo estimado en las fases sucesivas de prelavado, lavado principal y tres etapas de enjuague y neutralización, indexadas a la capacidad de carga nominal del equipo de 22 kg en condiciones estándar de operación, alineándose con las metodologías de planeación de requerimientos descritas por Render y Heizer (2014) y Chase et al. (2018), y, finalmente, por el personal de línea, representado por dos operadores encargados de ejecutar de forma estandarizada la manipulación de las válvulas de compuerta por gravedad y el levantamiento del registro analítico diario a pie de máquina.

Contexto de la Investigación y Datos de Línea Base

El diseño del sistema de estandarización y control propuesto en este estudio se fundamenta de forma retrospectiva en las restricciones paramétricas y las caracterizaciones técnicas previas descritas por Palma (2026) y Palma (en prensa). Para garantizar la autosuficiente consistencia matemática y la replicabilidad del presente modelo de gestión, se adoptan como línea base y variables de entrada los indicadores operativos y analíticos consolidados en las investigaciones antecedentes. En primer lugar, respecto al volumen y relación de eficiencia hídrica, se establece que el sistema de filtración por membranas del nodo proveedor opera bajo una relación de eficiencia aproximada de 7:1; es decir, por cada 7 litros de agua purificada de grado alimentario se estima la generación de 1 litro de efluente de rechazo concentrado. Considerando un escenario de operación parcial correspondiente al 30% de la capacidad instalada, se proyecta una producción estimada de 2,100 litros diarios de agua purificada, lo que se traduce en una oferta nominal calculada de aproximadamente 300 litros diarios de agua de descarte. Este volumen hídrico marginal permite cubrir de forma teórica el requerimiento agregado de un ciclo de operación pesada en el nodo receptor, el cual está fijado en 300 litros por ciclo. En segundo lugar, la caracterización fisicoquímica del efluente se alimenta del histórico de campo consolidado a partir de un tamaño de muestra de $n=5$ mediciones directas obtenidas en días hábiles operativos consecutivos a una hora fija estandarizada (12:00 p. m.) para mitigar sesgos por fluctuaciones de la red; dichos análisis previos con instrumentación digital calibrada situaron el valor promedio de Sólidos Disueltos Totales (TDS) en 192.2 mg/L con una desviación estándar de 7.98 mg/L, un valor mínimo de 180 mg/L, un máximo de 199 mg/L, un pH promedio de 8.44 con una desviación de 0.13, y una concentración nominal de dureza total y cloro residual de 0 mg/L. Finalmente, ante la ausencia de especificaciones mecánicas particulares por parte de la unidad de lavado local, se adoptó a partir de la literatura especializada en ingeniería de calidad (Besterfield, 2018; Montgomery, 2020) un límite crítico superior teórico de 150 mg/L de dureza total y una restricción operativa general de 500 ppm de TDS en la tina de mezcla. Este umbral normativo se establece con el propósito de mitigar de manera preventiva el riesgo de incrustación de sarro en las resistencias térmicas, evitar el desgaste prematuro de los activos fijos y prevenir la inhibición química de los agentes tensoactivos del detergente. Estos valores de referencia históricos y límites teóricos normativos constituyen las restricciones de diseño finales que gobiernan los algoritmos predictivos de la Matriz de Control Operativo.

Instrumentos de Recolección de Datos

Para erradicar la toma de decisiones empírico-intuitivas y asegurar la trazabilidad informativa en el lugar de trabajo, se estructuró un sistema de gestión visual basado en herramientas clásicas de la ingeniería de calidad (Ishikawa, 1989). El diseño de los instrumentos se centró en el desarrollo y validación en campo de tres herramientas específicas interconectadas; en primer lugar, se estructuraron la Tabla 1 y la Tabla 2, correspondientes al Formato de Registro Diario para el Monitoreo Físico-Químico del Agua de Rechazo (Ósmosis Inversa) y de la Red Pública, los cuales operan en sus respectivas mesas de control y fueron diseñados para la captura diaria de la Variable Crítica para la Calidad (CTQ) principal, específicamente los Sólidos Disueltos Totales (TDS) medidos cuantitativamente a pie de máquina mediante el dispositivo digital portátil calibrado. En segundo lugar, el sistema incorpora la Tabla 3, denominada Matriz de Control Operativo Indexada al Impacto de Sustentabilidad Hídrica, la cual constituye un instrumento dinámico de soporte a las operaciones que funciona como el algoritmo de decisión del nodo, teniendo como propósito fundamental correlacionar la lectura instantánea de TDS con las acciones físicas de apertura o cierre en las válvulas de compuerta por gravedad, traduciendo así el dato científico en una instrucción operativa visual y paramétrica para el operario (Feigenbaum, 1991).

Procedimiento

El procedimiento diseñado para la futura recolección de datos analíticos y control operativo está estructurado para llevarse a cabo directamente en el Gemba durante la puesta en marcha del suministro coordinado. El protocolo establece un muestreo diario sistemático efectuado al inicio de las operaciones del nodo de lavado. Antes de proceder con la lectura analítica del efluente marginal, el operador implementará un protocolo estándar de verificación y calibración para el medidor portátil de Sólidos Disueltos Totales (TDS) utilizando una solución de referencia conocida, eliminando sesgos instrumentales y garantizando la confiabilidad de los registros capturados (Feigenbaum, 1991). Una vez obtenido el valor cuantitativo de TDS, el operario estará facultado para consultar de forma inmediata la Matriz de Control Operativo e Impacto Sustentable (Tabla 3) con el fin de ejecutar mecánicamente la manipulación de las válvulas de compuerta por gravedad; esto permitirá dosificar de manera predictiva la mezcla hídrica exacta requerida para el ciclo de lavado en función de la calidad registrada, sistematizando la transición operativa antes de la apertura del flujo continuo.

Análisis de Datos

Debido al carácter cuantitativo e ingenieril del estudio, no se aplicaron métodos de análisis cualitativo como el análisis temático o de contenido. En su lugar, el análisis de datos se centró en la ingeniería de calidad y el diseño paramétrico de límites de control operativos (Montgomery, 2020). Los datos históricos de variabilidad de la tina de origen sirvieron como base predictiva para establecer los rangos de Sólidos Disueltos Totales (TDS) y durezas equivalentes en la Matriz de Control (Besterfield, 2018). Posteriormente, estos umbrales se utilizaron para ejecutar un modelado determinista de balance de masa hídrico, calculando los volúmenes de ahorro potencial de agua potable de la red pública municipal en función de las modificaciones dinámicas en las relaciones de mezcla (desde la línea base 70/30 hasta los límites de optimización 100/0 y mitigación 50/50), asegurando la congruencia matemática entre la oferta de desecho de la purificadora y la demanda de la lavandería (Render & Heizer, 2014).

Consideraciones Éticas

Aunque la presente investigación no involucró experimentación clínica ni biomédica con seres humanos o especímenes animales, el protocolo se rigió bajo estrictos principios de ética científica, transparencia analítica y responsabilidad ambiental (Ander-Egg, 2011). Estas consideraciones se articularon de forma integral en tres dimensiones fundamentales; en primer lugar, se garantizó la transparencia en la delimitación de datos al declarar explícitamente el uso de la línea base histórica del año 2024 y la exclusión de los registros de campo correspondientes al año 2025 debido a una delimitación temporal estricta de la investigación de origen (Palma, 2026), erradicando así cualquier sesgo o manipulación selectiva de información operativa o de volumen. En segundo lugar, se salvaguardó la propiedad intelectual y la confidencialidad comercial de los establecimientos participantes mediante el uso de nomenclaturas técnicas neutrales para describir los nodos del ecosistema, asegurando simultáneamente el debido crédito académico al trabajo de maestría antecedente a través del estándar de citación APA de séptima edición. Finalmente, la dimensión de responsabilidad eco-social se consolidó al priorizar el equilibrio hídrico regional de Cuautla, Morelos, estructurando un algoritmo de control operativo que garantiza que el reúso del efluente de ósmosis cumpla estrictamente con los parámetros de contacto seguro exigidos por organismos internacionales (EPA, 2012) y los límites máximos permisibles para servicios al público dictados por la normatividad nacional vigente (NOM-003-SEMARNAT-1997), blindando así la seguridad sanitaria del consumidor final en su interacción con las prendas textiles procesadas.

RESULTADOS

Presentación de los Datos e Instrumentos de Ingeniería de Calidad

Como resultado directo de la etapa de planificación operativa, se diseñó un sistema de control hídrico inter-empresarial centrado en herramientas de registro primario (Hojas de Verificación) adaptadas de los principios de gestión de calidad en el Gemba (Ishikawa, 1989). El diseño estructural de los instrumentos eliminó la subjetividad en la recolección de datos mediante campos de entrada cronológica, permitiendo registrar las Variables Críticas para la Calidad (CTQ) indispensables para evaluar la mezcla óptima del recurso. La Tabla 1 expone el formato estandarizado propuesto para el nodo de generación, destinado a registrar las fluctuaciones del efluente marginal antes de ingresar al tanque de almacenamiento.

Tabla 1

Formato de Registro Diario para el Monitoreo del Agua de Rechazo (Ósmosis Inversa)

Fecha	Hora	No. De Muestra	TDS (ppm)	Cloro (mg/L)	pH	Dureza (mg/L)	Estado (Color)

Nota: Plantilla operativa para el seguimiento del efluente generado en el sistema de rechazo de la planta purificadora (Adaptado del Anexo C-1 de la tesis de origen, Palma, 2026).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2

Formato de Registro Diario para el Monitoreo de Calidad en Agua de Lavandería

Fecha	Hora	No. De Muestra	TDS (ppm)	Cloro (mg/L)	pH	Dureza (mg/L)	Estado (Color)

Nota: Plantilla de campo para la evaluación de las condiciones del agua mezclada y suministrada directamente al proceso de lavado comercial (Adaptado del Anexo C-1 de la tesis de origen, Palma, 2026).

Fuente: elaboración propia.

Especificación del Protocolo de Medición y Flexibilidad Operativa

Para viabilizar la operación del nodo sin incurrir en costos elevados de laboratorio (Low-CapEx), se definió un protocolo técnico de medición analítica. Las lecturas de Sólidos Disueltos Totales (TDS) se ejecutan mediante el dispositivo portátil digital calibrado. Por otro lado, las variables de pH y cloro libre residual se determinan a través de métodos colorimétricos comerciales estandarizados (solución de fenol rojo y ortotolidina-OTO, respectivamente). Finalmente, la presencia y cuantificación volumétrica de la dureza total se realiza mediante reactivos de titulación directa en campo (soluciones 6 y 7 de

Pentair). Este compendio metodológico garantiza un control robusto a pie de máquina utilizando insumos listos para su uso de fábrica que no requieren procesos complejos de calibración secundaria.

La mayor aportación de este modelo radica en la transformación de los datos pasivos en una guía de diagnóstico activo mediante la estructura de la Matriz de Control Operativo e Impacto Sustentable (Tabla 3). Esta matriz funciona como el algoritmo de decisión que traduce las mediciones instantáneas en acciones mecánicas sobre las válvulas de compuerta por gravedad.

Tabla 3

Matriz de Control Operativo Indexada al Impacto de Sustentabilidad Hídrica

Estado (Color)	Proporción de Mezcla	TDS (ppm) y Dureza (mg/L)	pH y Cloro (mg/L)	Acción Operativa en Válvulas	Agua del municipio consumida	Ahorro de Agua (Impacto Regional)
Azul (Óptimo)	100% ROI	TDS<200	pH 6-5-8.5	Operar al 100% con el agua de rechazo.	0 Litros	300 litros (100% por ciclo)
	0% Red Pub.	Dureza<80	Cloro>0.2			
Azul (Óptimo)	80% ROI	TDS 200 a 350	pH 6-5-8.5	Restringir red pública al mínimo.	60 Litros	240 litros (80% por ciclo)
	20% Red Pub.	Dureza 80	Cloro>0.2			
Verde (Base)	70% ROI	TDS 351 a 500	pH 6-5-8.5	Mantener posición nominal.	90 Litros	210 litros (70% por ciclo)
	30% Red Pub.	Dureza 121 a 150	Cloro>0.2			
Amarillo (Alerta)	60% ROI	TDS 501 a 700	pH Fuera de rango	Abrir válvula de red un 10% más.	120 Litros	180 litros (60% por ciclo)
	40% Red Pub.	Dureza 151 a 220	Cloro>0.2			
Rojo (Crítico)	50% ROI	TDS>700	Variabilidad severa	Suministrar 50% agua de red a la mezcla.	150 Litros	150 litros (50% por ciclo)
	50% Red Pub.	Dureza>220				

Nota: Modelo estandarizado de toma de decisiones operativas basado en un volumen de control indexado de 300 litros por ciclo completo de lavado industrial (Elaboración propia, 2026).

Fuente: elaboración propia.

Al establecer límites de advertencia estructurados mediante códigos de color, el sistema faculta al operario para identificar visualmente desviaciones analíticas. Ante incrementos de los TDS por encima de 500 ppm (equivalente a superar el umbral crítico de 150 mg/L de dureza), el instrumento instruye transicionar de la mezcla base 70/30 a una relación de mitigación 60/40 o 50/50. Esta acción disminuye instantáneamente la concentración de calcio y magnesio en la tina de lavado, evitando que el sarro "corte" el detergente o incruste las resistencias térmicas de las maquinarias, consolidando un ahorro de entre 150 y 210 litros de agua de la red pública por ciclo en rangos operativos nominales y de alerta.

Requerimientos Funcionales del Proceso (Validación Analítica del Diseño)

Debido a que la presente investigación se centra en el modelado técnico y el diseño estandarizado de una tecnología de gestión antes de su implantación física definitiva en campo, la evaluación funcional de los instrumentos no deviene de testimonios discursivos de operadores humanos, sino del cumplimiento riguroso de las restricciones operativas y de los requerimientos analíticos del proceso receptor. Al cruzar los límites normativos ambientales con las tolerancias mecánicas de la lavandería comercial, el algoritmo propuesto en la Tabla 3 demuestra su validez matemática y funcional al reducir significativamente la probabilidad de que la tina de lavado reciba un agua con dureza superior a las 150 ppm, manteniendo el efluente dentro de los márgenes de seguridad establecidos siempre que se asegure la estricta adherencia del operador al protocolo de dilución por gravedad. El diseño del instrumento responde de forma exacta a la necesidad crítica de la microorganización de contar con un sistema preventivo de control estadístico de procesos (SPC) que no requiera personal especializado en análisis químicos, blindando la viabilidad operativa y la seguridad textil desde la fase de planeación de la simbiosis industrial.

DISCUSIÓN

Interpretación de los Resultados

Los resultados derivados del diseño de los Formatos de Registro Diario (Tablas 1 y 2) y de la Matriz de Control Operativo (Tabla 3) demuestran que la variabilidad física y química de un recurso hídrico marginal puede ser gestionada eficazmente mediante herramientas clásicas de la ingeniería de calidad. Al contrastar este enfoque con la literatura contemporánea de administración de operaciones, autores como Montgomery (2020) y Gutiérrez (2014) sostienen que el aseguramiento de la calidad en procesos estables requiere de sistemas de monitoreo estadístico continuos. Sin embargo, en el ámbito de las microorganizaciones de economías emergentes, la implementación de laboratorios automatizados en tiempo real resulta económicamente inviable. En este sentido, los resultados de la presente investigación extienden lo establecido por Ishikawa (1989) y Feigenbaum (1991), al demostrar que la transferencia tecnológica de herramientas visuales al lugar de trabajo o Gemba permite a personal no especializado ejecutar diagnósticos analíticos precisos a pie de máquina. La utilización del medidor de Sólidos Disueltos Totales (TDS), complementada con la verificación analítica mediante el blanco de referencia de agua purificada y reactivos colorimétricos listos para su uso de fábrica, prueba que es posible transicionar de una gestión puramente empírica o intuitiva hacia un modelo de operaciones paramétrico y estandarizado, garantizando la estabilidad de las propiedades hídricas sin incurrir en inversiones de capital elevadas (Low-CapEx). Bajo esta premisa, el algoritmo propuesto en la Matriz de Control Operativo (Tabla 3) sustenta su validez matemática y operativa al mitigar de forma teórica la probabilidad de que la tina de lavado reciba un agua con dureza superior a las 150 ppm. De este modo, los instrumentos propuestos se configuran como mecanismos preventivos de control en tiempo real listos para su despliegue en el arranque operativo, diseñados específicamente para salvaguardar la infraestructura técnica de la lavandería y asegurar las propiedades de las prendas procesadas desde el primer ciclo de suministro coordinado.

Implicaciones Teóricas y Prácticas

Las implicaciones prácticas de este modelo de estandarización operativa impactan de forma directa en los balances de masa macrooperativos y en la planeación de la capacidad de los nodos productivos coordinados. Evaluando el comportamiento temporal del ecosistema hídrico en Cuautla, Morelos, la línea base histórica correspondiente al año 2024 registró un desecho inicial de aproximadamente 3,550 litros mensuales de agua de rechazo de ósmosis inversa, operando al 11% de la capacidad instalada de la planta purificadora de garrafones, lo que representó un desperdicio anualizado de 42,600 litros vertidos al drenaje (Palma, 2026). Bajo la premisa de un crecimiento sostenido del mercado,

acientamiento gradual y estabilidad socioeconómica regional, se estructuró un escenario prospectivo donde, al consolidar un nivel operativo del 30% de la capacidad instalada, el volumen de efluente marginal escalará a 9,450 litros mensuales, alcanzando un total disponible estimado de 113,400 litros anuales. Al relacionar este techo teórico de suministro con la demanda del nodo receptor, el cual se ha establecido bajo una base nominal aproximada de 300 litros por ciclo de operación pesada, consolidando un consumo estimado de 22,500 litros mensuales (equivalente a 75 ciclos mensuales o una tasa operativa promedio de 2.8 ciclos diarios), se evidencia que la lavandería posee la capacidad de absorción hídrica suficiente para consumir el 100% del desecho generado por la purificadora en este escenario simulado de expansión, logrando un modelo potencial de cero vertido del efluente concentrado.

Asimismo, este esquema de ahorro gradual proyectado al 30% de la capacidad instalada adquiere una relevancia social y operativa estratégica durante la temporada de calor, de forma específica en el periodo de estiaje que afecta cíclicamente a la infraestructura municipal. Durante este lapso de estrés hídrico, el incremento estacional en la demanda y producción de garrafones en la purificadora acelera proporcionalmente la tasa de generación del efluente de rechazo; al ser absorbido íntegramente por el nodo de lavado bajo las directrices de la Matriz de Control Operativo, se reduce drásticamente la extracción física de agua potable de la red pública. Esta dinámica contracíclica mitiga la presión sobre el acuífero local en la época del año más crítica, liberando de manera indirecta volúmenes significativos de agua limpia para el abastecimiento de los hogares y los sectores productivos colindantes de la región. Teóricamente, la aportación diferenciadora de la investigación radica en que la Matriz de Control Operativo no plantea una estandarización rígida, sino una flexibilidad adaptativa gobernada por la ingeniería de calidad. Esto significa que, si bien el balance de masa anual demuestra macroeconómicamente que la unidad de lavado tiene la capacidad de absorber el 100% del efluente proyectado al 30% de producción, la variabilidad química diaria del recurso impide que se suministre de forma directa o indiscriminada. Por lo tanto, la caracterización analítica ejecutada día con día en los Formatos de Registro Diario se vuelve obligatoria; actúa como el único mecanismo capaz de alimentar los algoritmos de la Matriz para dosificar dinámicamente la mezcla hidráulica (escenarios Azul, Verde, Amarillo o Rojo). De este modo, los instrumentos propuestos operan como mecanismos de controles técnicos en tiempo real, diseñados para proteger los activos fijos de la lavandería, así como para mantener la calidad, higiene y suavidad textil exigida en el servicio final. Así, se dota a la administración de operaciones de un marco administrativo real que equilibra la eficiencia ecológica regional con la seguridad de la continuidad del proceso.

Limitaciones del Estudio

Es necesario acotar de forma transparente las fronteras metodológicas y analíticas de la presente investigación. Desde una perspectiva temporal, los registros analíticos correspondientes al año 2025 fueron excluidos por una delimitación estricta del protocolo de la investigación de origen (Palma, 2026), fundamentando las proyecciones en la capacidad de diseño y en la línea base de 2024. Asimismo, el modelo asume un escenario de estabilidad macroeconómica en la demanda local de garrafones de 20 litros y la permanencia constante de las propiedades geohidrológicas de la red de suministro público de Cuautla.

Una limitación técnica fundamental radica en que la Matriz de Control Operativo se diseñó y calibró respondiendo exclusivamente a las restricciones analíticas de dos componentes específicos del proceso. En primer lugar, se consideraron los requerimientos operativos de la unidad de lavado comercial, parametrizando los límites de mezcla por debajo de las 500 ppm de TDS (equivalentes a 150 mg/L de dureza total) para salvaguardar la integridad de los activos fijos, previniendo la incrustación de sarro en las resistencias térmicas y el desgaste mecánico de la maquinaria industrial. En segundo lugar, se priorizaron las restricciones de calidad exigidas en el servicio textil, asegurando

que la dilución del agua de reúso no afecte negativamente la suavidad, coloración o condiciones de higiene de las prendas procesadas, bajo el amparo normativo de la NOM-003-SEMARNAT-1997. Por consiguiente, los umbrales estandarizados en este estudio no son directamente extrapolables a otros giros industriales de la región, requiriéndose un recálculo analítico completo de la matriz si se deseara aplicar el instrumento en entornos con tolerancias mecánicas o comerciales distintas.

CONCLUSIÓN

La presente investigación reafirma que la estandarización de los procesos operativos es un requisito indispensable para el éxito de los modelos de economía circular a microescala industrial. A través del diseño y la validación por modelado de los Formatos de Registro Diario fundamentados en la ingeniería de calidad, se estructura un mecanismo capaz de organizar de manera sistemática el monitoreo diario de las propiedades del efluente marginal, con el objetivo de eliminar la toma de decisiones empírico-intuitivas en el Gemba. La Matriz de Control Operativo e Impacto Sustentable se consolida matemáticamente como una herramienta eficaz para la mitigación y control de la variabilidad analítica en el campo de operación, estando estructurada para facultar al operario en la ejecución de ajustes técnicos inmediatos durante la puesta en marcha del suministro, mediante un sistema de gestión visual de bajo costo de inversión (Low-CapEx). Se concluye que el aseguramiento de la calidad en el registro de variables críticas como los Sólidos Disueltos Totales (TDS) está diseñado para proteger la infraestructura física de la unidad de lavado contra daños mecánicos por incrustación de sarro, al mismo tiempo que salvaguarda la calidad, higiene y suavidad textil exigidas en el servicio bajo el marco normativo de la NOM-003-SEMARNAT-1997. Asimismo, el modelado prospectivo demuestra que, ante un incremento gradual en la capacidad operativa de la planta purificadora hasta alcanzar el 30%, el nodo receptor posee la capacidad analítica para absorber el 100% de los 113,400 litros anuales de desecho generados, consolidando un esquema efectivo de cero vertidos concentrados. Este beneficio adquiere una dimensión estratégica durante la temporada de estiaje, donde la dinámica contracíclica del modelo reduce la demanda sobre la red pública municipal, liberando de forma indirecta volúmenes significativos de agua potable para los hogares y sectores productivos de Cuautla, Morelos. En definitiva, este enfoque equilibra la sustentabilidad ambiental con el rigor administrativo, ofreciendo a las pequeñas unidades productivas un camino claro y replicable hacia la ecoeficiencia operativa y la resiliencia hídrica regional.

RECOMENDACIONES

Para futuras líneas de investigación, se sugiere evaluar la transición del sistema de gestión visual manual hacia esquemas de automatización de bajo costo utilizando tecnologías de hardware abierto. El acoplamiento de sensores de conductividad eléctrica continuos a microcontroladores de bajo precio (como plataformas Arduino o Raspberry Pi) permitiría accionar servomotores en las válvulas de compuerta por gravedad, desarrollando un mecanismo Poka-Yoke físico que ejecute las mezclas hidráulicas de forma automatizada en tiempo real al detectar variaciones en los TDS, reduciendo a cero la dependencia del factor humano en el registro. Finalmente, se recomienda desarrollar estudios complementarios fundamentados en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) bajo estándares ISO 14040, con el objetivo de cuantificar formalmente la reducción de la huella de carbono y el impacto ambiental neto que la implementación a gran escala de estos instrumentos de calidad aportaría al acuífero de la región de Morelos.

REFERENCIAS

- Ander-Egg, E. (2011). Aprender a investigar: Nociones básicas para la investigación social. Editorial Brujas.
- Barker, J., & Smith, L. (2019). Water conservation strategies in commercial textiles and commercial laundry facilities. *International Journal of Cleaner Production*, 212, 880-892. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.145>
- Besterfield, D. H. (2018). Control de calidad (9.ª ed.). Pearson Educación.
- Chase, R. B., Shankar, R., & Jacobs, F. R. (2018). Administración de operaciones: Producción y cadena de suministros (14.ª ed.). McGraw-Hill.
- Deming, W. E. (1989). Calidad, productividad y competitividad: La salida de la crisis. Ediciones Díaz de Santos.
- Environmental Protection Agency. (2012). Guidelines for Water Reuse (Report No. EPA/600/R-12/618). U.S. Environmental Protection Agency.
- Evans, J. R., & Lindsay, W. M. (2015). Administración y control de la calidad (9.ª ed.). Cengage Learning.
- Feigenbaum, A. V. (1991). Total quality control (3.ª ed. revisada). McGraw-Hill.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gutiérrez, H. (2014). Calidad total y productividad (4.ª ed.). McGraw-Hill.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill.
- Ishikawa, K. (1986). Guide to quality control (2.ª ed. revisada). Asian Productivity Organization.
- Ishikawa, K. (1989). ¿Qué es el control total de calidad?: La modalidad japonesa. Editorial Norma.
- Krajewski, L. J., Ritzman, L. P., & Malhotra, M. K. (2013). Administración de operaciones: Procesos y cadena de suministro (10.ª ed.). Pearson Educación.
- Montgomery, D. C. (2020). Introduction to statistical quality control (8.ª ed.). John Wiley & Sons.
- Palma, C. (2026). Viabilidad del reúso de agua de rechazo en lavandería bajo un modelo de economía circular (Tesis de maestría no publicada). Instituto Tecnológico de Cuautla, Cuautla, Morelos, México.
- Palma, C. (en prensa). Simbiosis Industrial: Viabilidad Técnica del Reúso de Agua de Ósmosis Inversa en Lavanderías del Centro de México. Revista LATAM.
- Pineda, L. (2023). La problemática de la gestión del agua en el sector industrial de Cuautla y zonas metropolitanas. *Revista de Ciencias Sociales de Morelos*, 14(2), 77-94.
- Render, B., & Heizer, J. (2014). Principios de administración de operaciones (9.ª ed.). Pearson Educación.
- Sabatino, S. F. (2022). Economía circular en pequeñas y medianas empresas: Desafíos y oportunidades en América Latina. *Revista de Gestión Ambiental*, 41, 15-28.

Schroeder, R. G., Goldstein, S. M., & Rungtusanatham, M. J. (2011). Administración de operaciones: Conceptos y casos contemporáneos (5.ª ed.). McGraw-Hill.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (1997, 7 de enero). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación.

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#) .