



REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 3, Número 3
Julio-Septiembre 2026

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, www.omniscens.com

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 3
julio-septiembre 2026

Publicación trimestral
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: admin@omniscens.com

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.



Copyright © 2026: Los autores



9773061781003

Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 3, Núm. 3, julio-septiembre 2026, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, admin@omniscens.com, Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 julio 2026.



Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 3, 2026, julio-septiembre

DOI: <https://doi.org/10.71112/ren4q111>

**ACREDITACIÓN INTEGRADA Y CONTROL DE PÉRDIDAS APARENTES:
EVIDENCIA EMPÍRICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE NORMAS 17025–17020 EN
LA MICROMEDICIÓN URBANA (2011–2025)**

**INTEGRATED ACCREDITATION AND CONTROL OF APPARENT LOSSES:
EMPIRICAL EVIDENCE FROM THE IMPLEMENTATION OF 17025–17020
STANDARDS IN URBAN MICRO-METERING (2011–2025)**

Javier Alfonso Mendoza Betin

Brahayan Camilo Sierra García

Ferney Jose Arias Caseres

Colombia

Accreditación integrada y control de pérdidas aparentes: evidencia empírica de la implementación de normas 17025–17020 en la micromedición urbana (2011–2025)
Integrated accreditation and control of apparent losses: empirical evidence from the implementation of 17025–17020 standards in urban micro-metering (2011–2025)

Dr. Javier Alfonso Mendoza Betin^{a,*}

j.mendozabetin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8355-8581>

Brahayan Camilo Sierra García^b

brahayansierra@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3819-8134>

Ferney Jose Arias Caseres^c

ferney.arias@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-9775-9906>

*Autor de correspondencia: j.mendozabetin@gmail.com, ^aUNINI Mexico, ^bUniversidad Nacional Abierta y a Distancia, ^cFundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Colombia

RESUMEN

La confiabilidad de la medición del agua incide en la equidad tarifaria, la sostenibilidad financiera y el control de pérdidas aparentes. Aunque la literatura se ha enfocado en laboratorios acreditados bajo ISO/IEC 17025, el aporte de los organismos de inspección acreditados bajo ISO/IEC 17020 continúa poco estudiado. Este trabajo evalúa si la acreditación integrada ISO/IEC 17025–17020 se asocia con mejoras medibles en el desempeño metrológico del parque de micromedición urbana, mediante un estudio de caso longitudinal en Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. (2011–2025). Se analizaron dos indicadores: error ponderado promedio del parque y porcentaje de medidores no conformes detectados y retirados. Se aplicaron

correlaciones de Pearson y Spearman, complementadas con entrevistas semiestructuradas a directores técnicos de operaciones Veolia y Acucar. Los resultados evidencian una asociación negativa significativa entre ambas variables ($r = -0,589$; $p = 0,021$; $\rho = -0,836$; $p < 0,001$). Se concluye que la acreditación integrada fortalece la trazabilidad decisional, reduce discrecionalidad y contribuye al control regulado de pérdidas aparentes.

Palabras clave: acreditación ISO/IEC 17025–17020; pérdidas aparentes; error ponderado del medidor; gobernanza del dato metrológico; gestión del parque de medidores.

ABSTRACT

The reliability of water metering affects tariff fairness, financial sustainability, and the control of apparent losses. Although the literature has mainly focused on laboratories accredited under ISO/IEC 17025, the contribution of inspection bodies accredited under ISO/IEC 17020 remains underexplored. This study evaluates whether integrated ISO/IEC 17025–17020 accreditation is associated with measurable improvements in the metrological performance of the urban micro-metering fleet through a longitudinal case study at Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. (2011–2025). Two indicators were analyzed: weighted average fleet error and the percentage of nonconforming meters detected and removed. Pearson and Spearman correlations were applied, complemented by semi-structured interviews with technical operations directors from Veolia and Acucar. The results show a significant negative association between both variables ($r = -0.589$; $p = 0.021$; $\rho = -0.836$; $p < 0.001$). It is concluded that integrated accreditation strengthens decision traceability, reduces discretion, and contributes to the regulated control of apparent losses.

Keywords: ISO/IEC 17025–17020 accreditation; apparent losses; weighted meter error; metrological data governance; meter fleet management.

Recibido: 23 abril 2026 | Aceptado: 8 julio 2026 | Publicado: 9 julio 2026

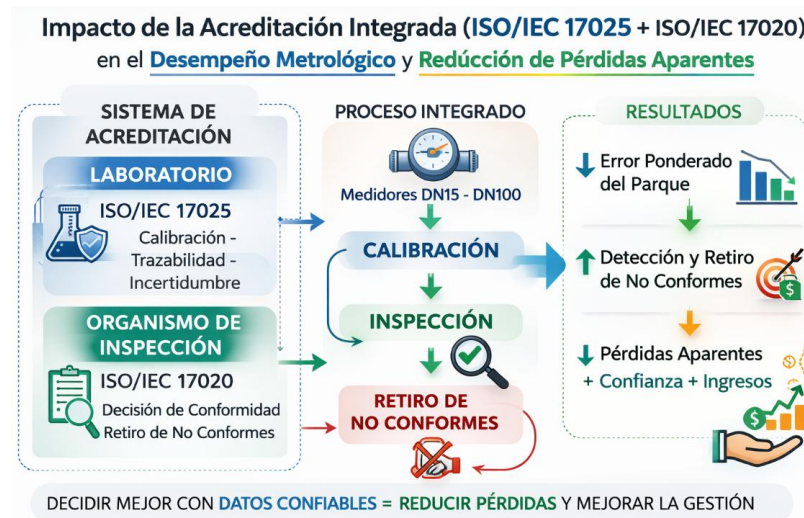
INTRODUCCIÓN

La confiabilidad de la medición de agua es un determinante directo de la equidad tarifaria, la sostenibilidad financiera y el control de las pérdidas aparentes de agua en las empresas de acueducto. Aunque la literatura ha avanzado de manera amplia en el desempeño metrológico de los medidores y en la acreditación de laboratorios bajo ISO/IEC 17025, sigue existiendo un vacío notable respecto al papel de los organismos de inspección acreditados bajo ISO/IEC 17020, pese a que sus decisiones de conformidad, aceptar, rechazar o retirar medidores, impactan la facturación y el subregistro. En Colombia, este vacío es particularmente relevante: el Organismo de Inspección de Aguas de Cartagena (Acuacar) constituye el primer caso acreditado por Órgano Nacional de Acreditación (ONAC) dentro de una empresa prestadora, integrando calibración e inspección como un sistema único de control metrológico.

Con base en datos trazables y custodiados por los Organismos Acreditados (OA) entre 2011 y 2025, este estudio evalúa la relación entre dos indicadores núcleo: el error ponderado promedio del parque y el porcentaje de medidores no conformes detectados y retirados. A través de análisis de correlación (Pearson/Spearman) y evidencia cualitativa experta, se busca aportar evidencia empírica sobre el efecto real de la acreditación integrada en la gestión del parque y el control de pérdidas aparentes.

Figura 1

Esquema conceptual del sistema integrado de calibración e inspección acreditadas y su efecto en el desempeño metrológico del parque de medidores.



Nota: Elaboración propia (2026)

Marco teórico

La medición confiable del consumo de agua es fundamental para garantizar ingresos justos, confianza de los usuarios y una gestión eficiente de las pérdidas. Por ello, la acreditación de laboratorios y organismos de inspección, (OA), bajo normas internacionales es clave para asegurar la calidad y confiabilidad de los sistemas de medición, especialmente en medidores entre DN15 y DN100, en otras palabras, desde ½" a 4".

Aunque existen numerosos estudios sobre el desempeño de los medidores enfocados en los laboratorios de calibración, los organismos de inspección han recibido poca atención. Esto resulta llamativo, ya que sus decisiones sobre aceptar, rechazar o retirar equipos influyen directamente en la facturación y en las pérdidas aparentes de agua de las empresas de acueducto.

En Colombia, esta brecha es especialmente significativa. El Organismo de Inspección de Aguas de Cartagena, primero en su tipo acreditado por ONAC dentro de una empresa de servicios públicos de acueducto y alcantarillado, complementó calibración e inspección en un

mismo esquema de control metrológico junto al laboratorio. Sin embargo, aún no existen estudios que demuestren con datos su impacto real en las pérdidas aparentes de agua y en la calidad de la información comercial.

Además, en Aguas de Cartagena “Acuacar” el manejo del dato exige trabajar únicamente con información generada, validada y custodiada por el Laboratorio de Metrología y el Organismo de Inspección, (OA), con trazabilidad comprobada entre 2011 y 2025. Por esta razón, el estudio se enfoca en dos indicadores clave: el error ponderado promedio del parque de medidores y el porcentaje de equipos no conformes retirados y ensayados. Ambos reflejan de forma directa y confiable el impacto del sistema de acreditación en el control del subregistro y en las decisiones operativas que influyen en las pérdidas aparentes.

Con base en este contexto técnico, normativo e institucional, la investigación busca determinar si la implementación progresiva de la acreditación del Laboratorio (ISO/IEC 17025) y del Organismo de Inspección (ISO/IEC 17020) en Acuacar ha generado cambios reales en el desempeño del parque de medidores.

En particular, se plantea que este sistema integrado contribuye a reducir el error promedio y a aumentar la detección y retiro de medidores no conformes, frente a los períodos anteriores a la acreditación. La validación de esta hipótesis, mediante un análisis estadístico adecuado, permitirá aportar evidencia sólida sobre el papel de la acreditación en el control de las pérdidas aparentes de agua.

Acreditación y metrología de medidores de agua: visión internacional

La acreditación de los laboratorios de calibración y de los organismos de inspección es la base para garantizar la confiabilidad de los sistemas de medición de agua potable, especialmente en los diámetros comerciales entre DN15 y DN100, incluyendo aquellos que actualmente se encuentran en proceso de acreditación ante ONAC en Acuacar. En este contexto, la norma ISO/IEC 17025:2017 establece los requisitos clave en materia de

competencia técnica, gestión de la calidad, trazabilidad e incertidumbre, consolidándose como el principal referente internacional en este ámbito de los laboratorios (International Organization for Standardization, 2017).

De manera complementaria, la ISO/IEC 17020:2012 define los requisitos que deben cumplir los organismos de inspección, ya sean de primera, segunda o tercera parte, garantizando independencia y criterios claros al momento de tomar decisiones de conformidad. Esto resulta especialmente importante cuando se inspeccionan medidores en campo o se realizan verificaciones periódicas dentro de los programas de control metrológico (International Organization for Standardization, 2012).

Las guías de UNIDO y CITAC/EURACHEM apoyan la aplicación práctica de la ISO/IEC 17025 y 17020 y muestran que la acreditación no solo implica cumplir requisitos, sino asegurar la calidad y confiabilidad de los resultados ante terceros (CITAC & EURACHEM, 2002; UNIDO, 2009).

Normas metrológicas específicas para medidores de agua

En el caso de los medidores de agua potable fría y caliente, la referencia técnica principal es la serie ISO 4064 y su adopción en Colombia como NTC-ISO 4064 (International Organization for Standardization, 2014, 2016; ICONTEC, 2016). Estas normas establecen los requisitos metrológicos, las clases de exactitud, los rangos de caudal (Q_1 – Q_4), la razón metrológica R y las condiciones de ensayo para los diámetros más comunes.

A esto se suma la recomendación OIML R 49, que fija los lineamientos para el diseño, la verificación inicial y el control en servicio de los medidores, y que sirve de base para que los organismos de acreditación evalúen los alcances en diámetros entre DN15 y DN100 (International Organization of Legal Metrology, 2013).

Gestión de medidores y desempeño metrológico: autores internacionales clave

Desde el enfoque del desempeño metrológico y la gestión del parque de medidores, los trabajos de Arregui, Cabrera y Cobacho (2006), Arregui et al. (2018) y Cordeiro et al. (2022) son referentes ampliamente reconocidos. Estos autores proponen modelos para evaluar la precisión real en campo, definir estrategias de reemplazo y relacionar la calidad de la medición con la reducción de pérdidas aparentes y la equidad en la facturación. En particular, Arregui et al., (2018) introduce el concepto de “error ponderado”, que integra la curva de calibración con el perfil de consumo, ofreciendo una visión más realista del desempeño en diámetros DN15–25 y DN40–100.

Otros estudios complementan este enfoque. Hovany (2012) evidencia sesgos en consumos de corta duración; du Plessis (2015) muestra que el envejecimiento depende más de las condiciones de operación que de la edad; y Karadirek (2020, 2022) resalta la importancia de verificar los medidores según perfiles reales. A su vez, Cordeiro et al. (2022) y estudios de la Water Research Commission (e.g., Ncube et al., 2023; Palau et al., 2011) integran datos de distintos laboratorios para apoyar decisiones tecnológicas. En paralelo, la empresa alemana TÜV SÜD y otros laboratorios europeos operan bancos acreditados ISO/IEC 17025, consolidándose como referentes internacionales de trazabilidad.

Marco normativo, experiencias de acreditación y estudios en Colombia

En Colombia, la acreditación de los laboratorios de medidores de agua se rige por la ISO/IEC 17025 y por la regulación del sector, bajo la supervisión del Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), que define alcances según magnitud, intervalos, incertidumbre, tipo de instrumento y norma de referencia. Los certificados de acreditación, entre otros de; Empopasto y la EAB Bogotá, evidencian coberturas para medidores entre DN15 y DN100, con bancos diseñados conforme a ISO 4064-2:2016 (ONAC, 2025).

Desde el ámbito regulatorio colombiano, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) han establecido la calibración como un requisito legal de control metrológico, destacando que esta debe ser realizada por organismos acreditados, en línea con el Concepto 56 de 2020 y la normativa vigente. En el plano académico, los trabajos de Arenas (2011) y Brango-Padilla y Barajas-Patiño (2010) han aportado referentes metodológicos para el control de calidad y la mejora de procesos en laboratorios, fortaleciendo la aplicación práctica de la ISO/IEC 17025 en el contexto nacional.

El trabajo de Gulfo (2013) resalta la importancia de articular el aseguramiento metrológico con los sistemas integrados de gestión en las empresas de servicios públicos, fortaleciendo su relación con los esquemas de acreditación. De manera complementaria, el estudio de Escandón Beltrán y Sierra García (2018) profundiza en la calibración de un medidor DN15 bajo la NTC-ISO 4064, aportando al entendimiento de la incertidumbre, las correcciones por condiciones ambientales y la necesidad de bancos con alta estabilidad y trazabilidad.

Por su parte, Mendoza-Betin et al., (2024) amplían este enfoque al analizar el subcontaje y el sobredimensionamiento de medidores en condiciones reales en Cartagena, utilizando datos locales y del laboratorio de Veolia en Tunja. Sus resultados confirman que una calibración adecuada reduce los errores ponderados, mejora la evaluación de la vida útil y respalda decisiones técnicas sobre dimensionamiento, demostrando además que los errores sistemáticos pueden ser controlados mediante procedimientos metrológicos acreditados. Aportes locales: Caribe colombiano (laboratorios de medidores y organismos de inspección)

En la región Caribe colombiana se han consolidado experiencias relevantes en torno a laboratorios de metrología de medidores de agua, pero no de organismos de inspección, particularmente en ciudades como Cartagena, Montería y Sincelejo (operadas por Veolia con fuerte conexión con la región).

El Laboratorio de Metrología de Aguas de Cartagena opera bajo las normas NTC-ISO/IEC 17025 y NTC-ISO 4064, ofreciendo servicios de calibración de medidores DN15 a DN25, aseguramiento metrológico en presión y temperatura, y, recientemente, calibración de macromedidores (DN50-DN100) mediante trazabilidad con patrón Coriolis, actualmente en proceso de acreditación ante ONAC. De forma paralela, el Organismo de Inspección avanza en la actualización de su alcance para inspeccionar medidores entre DN40 y DN100 de manera acreditada.

En este marco, el estudio de Mendoza-Betin et al., (2024) se consolida como un referente local al demostrar, con datos empíricos, cómo las decisiones de dimensionamiento influyen en la exactitud, los errores ponderados y las pérdidas aparentes. De igual manera, el trabajo de Escandón-Beltrán y Sierra-García (2018) aporta al análisis detallado de la calibración en DN15 bajo la NTC-ISO 4064, fortaleciendo el entendimiento de la incertidumbre y las condiciones de ensayo.

Brecha en la evidencia empírica

Aunque existe un amplio desarrollo normativo y técnico sobre acreditación y desempeño metrológico, especialmente en torno a la ISO/IEC 17025, ISO/IEC 17020, ISO 4064 y OIML R 49, sigue existiendo un vacío importante en el estudio de los organismos de inspección de medidores de agua, en particular aquellos vinculados directamente a empresas de servicios públicos. En Colombia, este vacío es aún más evidente, considerando que el Organismo de Inspección de Acuacar es el primero de su tipo acreditado por ONAC dentro de una empresa prestadora, lo que representa un avance institucional relevante al integrar la inspección al esquema tradicional centrado en los laboratorios.

Sin embargo, la revisión de la literatura muestra que no existen estudios que analicen de manera sistemática el papel de estos organismos bajo la ISO/IEC 17020, ni su impacto en las pérdidas aparentes de agua, ya sea previo y luego de la acreditación, al igual que, la

calidad del dato comercial o la confianza de los usuarios. La mayoría de investigaciones sigue enfocada en laboratorios acreditados bajo la ISO/IEC 17025, dejando de lado el rol decisivo que tiene la inspección en la aceptación o retiro de medidores, especialmente en diámetros DN15–DN25.

Esta ausencia es aún más marcada en el contexto latinoamericano y en el Caribe colombiano, donde no se han desarrollado modelos que integren de forma estructurada la acreditación del laboratorio y del organismo de inspección. En este escenario, se abre una oportunidad clara para construir un enfoque integrado que permita evaluar, con evidencia empírica, el impacto real de esta articulación en el subregistro, el sobredimensionamiento, las pérdidas aparentes de agua y la confiabilidad de la información comercial. De esta manera, la investigación se posiciona como un aporte original, novedoso y pertinente, al documentar una experiencia inédita en el país y generar conocimiento aplicable a otros contextos.

Delimitación empírica por gobernanza y trazabilidad del dato

Un elemento clave de esta investigación es la gobernanza del dato, entendida como la responsabilidad institucional, la autorización de uso, la trazabilidad y la confiabilidad de la información. En Acuacar, el análisis solo puede apoyarse en variables generadas, validadas y custodiadas directamente por el Laboratorio de Metrología y el Organismo de Inspección, que son las únicas con respaldo institucional y control técnico.

Por esta razón, el estudio se concentra en dos indicadores con registros consistentes entre 2011 y 2025: el error ponderado promedio del parque de medidores, calculado a partir de calibraciones bajo NTC-ISO 4064 e ISO 4064, y el porcentaje de medidores no conformes retirados y ensayados mediante calibración e inspección, determinado mediante procesos acreditados bajo ISO/IEC 17025 e ISO/IEC 17020. Ambos reflejan de forma directa el desempeño del control metrológico, físico y su impacto en las pérdidas aparentes de agua.

Esta delimitación no responde a una limitación metodológica, sino a un criterio de rigor científico, al priorizar información verificable, auditada y alineada con los principios de imparcialidad, confidencialidad y uso responsable exigidos por ONAC. De este modo, la investigación se enfoca en variables con alta solidez técnica, sentando además una base confiable para futuros estudios que puedan incorporar otros componentes bajo esquemas ampliados de gobernanza del dato.

Hipótesis central de la investigación

Con base en lo anterior, se plantea la siguiente hipótesis central: la implementación progresiva del sistema de acreditación del Laboratorio de Medidores (ISO/IEC 17025) y del Organismo de Inspección de medidores pequeños y macros DN15–DN100 (ISO/IEC 17020) en Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. genera cambios estadísticamente significativos en el desempeño metrológico del parque de medidores. En particular, este proceso contribuye a reducir el error ponderado promedio y, al mismo tiempo, a incrementar la detección y el retiro oportuno de medidores no conformes, en comparación con los periodos previos a la acreditación y dentro del rango de diámetros analizado.

Objetivo de la investigación

El objetivo de esta investigación es analizar si la implementación conjunta de la acreditación del Laboratorio de Metrología bajo la norma ISO/IEC 17025 y del Organismo de Inspección bajo la ISO/IEC 17020 en Aguas de Cartagena se relaciona con mejoras en el desempeño metrológico del parque de medidores conforme al método adoptado en la investigación.

METODOLOGÍA

Para desarrollar el trabajo empírico se diseñó un método adhoc, de enfoque mixto (cualicuantitativo), de corte exploratorio, explicativo-descriptivo y carácter longitudinal, basado primeramente en el análisis numérico de información histórica previa y entre 2011 y 2025 como resultado de un promedio de 17.545 pruebas de calibración e inspecciones anuales en medidores de agua. El estudio se planteó como un caso único en Aguas de Cartagena S.A. E.S.P., reconstruyendo la evolución de los resultados de los ensayos en los OA a partir de los procesos de calibración, inspección y aseguramiento metrológico, cuyos resultados han sido documentados y auditados en el tiempo: en las etapas de pre - acreditación, acreditación de los OA y etapa posterior.

El análisis positivo se organizó en las tres etapas acotadas. Como variables y unidad de análisis se tomaron los valores anuales del error ponderado promedio y del porcentaje promedio de medidores no conformes evaluados por ambos OA, diferenciados por medidores pequeños (DN15-DN25) y macromedidores (DN50-DN100), es decir, en rangos de diámetros de medidores, por contar con trazabilidad histórica y consistencia técnica.

El procedimiento se desarrolló en cuatro fases: depuración y consolidación de datos, análisis descriptivo y exploratorio, definición operativa de variables y modelamiento estadístico. En esta última etapa se aplicó un análisis de varianza de dos factores (ANOVA) para evaluar el efecto previo de la acreditación, durante la acreditación, posterior a la mismas y del rango de diámetro sobre los indicadores, así como análisis de correlación para examinar la relación entre error y resultados de pruebas en medidores.

Específicamente, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson para verificar los supuestos de linealidad, normalidad y ausencia de valores atípicos influyentes. También, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman, por su carácter no paramétrico y mayor robustez frente a distribuciones asimétricas. Este enfoque permitió evaluar de manera objetiva

la consistencia entre el desempeño metrológico global del parque de medidores y las decisiones operativas asociadas a la detección y retiro de medidores no conformes; en otras palabras, resultados en inspecciones de medidores.

No obstante, contando con la autorización expresa de la alta dirección de Veolia, se desarrolló un componente cualitativo complementario mediante entrevistas semiestructuradas a los cinco (5) directores técnicos de los Laboratorios de Veolia Tunja, Veolia Montería y Aguas de Cartagena S.A. E.S.P y Triple A de Barranquilla.

La selección de los expertos se realizó mediante un muestreo intencional, priorizando profesionales con experiencia técnica directa en metrología e inspección de medidores de agua. Se buscó, en particular, expertos que trabajaran o hubieran trabajado en calibración, inspección y gestión del parque de medición, de manera que sus aportes estuvieran sustentados en práctica operativa y no solo en conocimiento teórico.

Para ello se consideraron varios criterios. Entre ellos, la experiencia en laboratorios de metrología, organismo de inspección, la participación en procesos vinculados con las normas ISO/IEC 17025 y 17020, el ejercicio de roles de liderazgo técnico en el sector de agua potable y la vinculación con empresas del grupo Veolia y del sector de agua potable, lo que permitió asegurar un contexto técnico comparable entre las organizaciones analizadas.

Este ejercicio tuvo como propósito profundizar en la interpretación técnica e institucional de los resultados cuantitativos; sus hallazgos se presentan y analizan en el apartado posterior del artículo.

Las entrevistas fueron grabadas en audio y transcritas textualmente, con el consentimiento de los participantes, y tuvieron una duración entre 60 y 90 minutos.

RESULTADOS

En la etapa de modelamiento inferencial se verificó que no fue procedente aplicar un ANOVA de dos factores, debido a limitaciones estructurales de la serie histórica y del diseño. En primer lugar, no se dispone de información para la fase de pre - acreditación anterior a 2011, lo que impide establecer una línea base robusta y comparable frente a los periodos posteriores. En segundo lugar, para Acuacar no se cuenta con datos suficientes y defendibles en el rango de diámetros de medidores (DN50–DN100), por lo cual el factor “rango de diámetro del medidor” no pudo ser operacionalizado con consistencia y completitud en el horizonte de análisis.

Como consecuencia directa, no fue posible estimar la interacción (Fases de análisis pre, acreditación y posterior) × (Rangos de diámetro de medidores), elemento crítico del enfoque multifactorial. Al no existir datos para todos los niveles combinados de los factores, se rompió el principio de estructura factorial y se incumplen supuestos mínimos del ANOVA (comparabilidad entre celdas, grados de libertad residuales y capacidad de estimar efectos principales e interacción). En síntesis, el diseño originalmente planteado no pudo materializarse estadísticamente, no por debilidad conceptual, sino por disponibilidad real del dato, que restringe el análisis a variables con trazabilidad y custodia verificables por los Organismos Acreditados.

Tabla 1.

Serie histórica del error ponderado promedio del parque de medidores y del porcentaje de medidores no conformes detectados y retirados (Acuacar, 2011–2025).

Año	Error ponderado promedio del parque de medidores (%)	Porcentaje de medidores no conformes detectados y retirados del parque	Datos Analizados (Pruebas realizadas en medidores)
2025	17,6	73,58	22.711
2024	20,7	69,97	19.873
2023	19,3	75,25	17.795

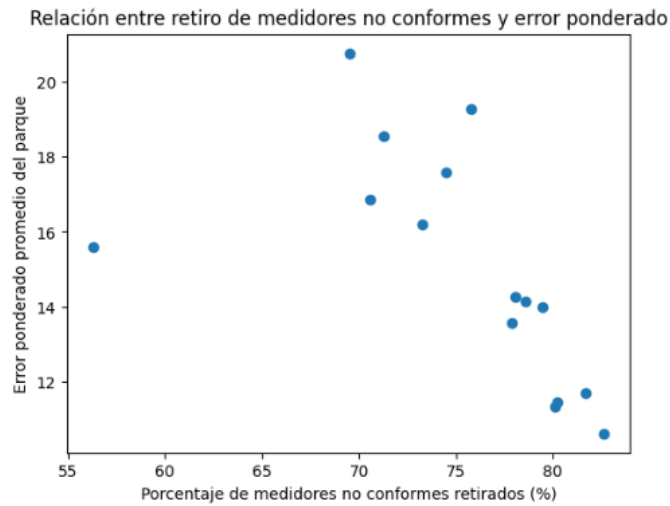
2022	18,6	70,64	16.145
2021	16,9	71,24	18.941
2020	17,5	73,57	17.213
2019	14,3	79,42	17.085
2018	14,1	79,7	17.568
2017	14	79,24	16.987
2016	13,6	77,72	16.025
2015	13,9	77,61	17.856
2014	14,2	76,76	16.789
2013	11,7	82,07	16.879
2012	11,3	86,54	16.045
2011	10,7	83,91	15.262

Nota: Elaboración propia (2026)

De hecho, dado que las variables analizadas corresponden a indicadores continuos medidos anualmente y no a tratamientos experimentales con réplicas, no se cumplen los supuestos para un ANOVA de dos factores clásico. En su lugar, se realizó un análisis de correlación y de tendencias temporales, complementado con visualización mediante gráficos de doble eje, permitiendo evaluar la relación entre el porcentaje de medidores no conformes retirados y el error ponderado promedio del parque.

Figura 2

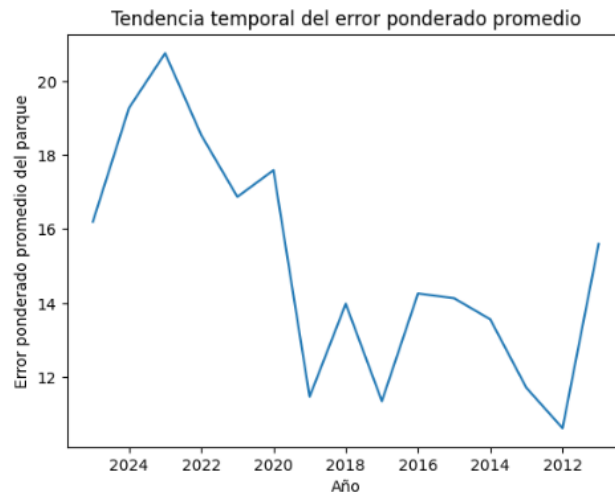
Relación entre retiro de medidores no conformes y error ponderado.



Nota: Elaboración propia (2026)

Figura 3

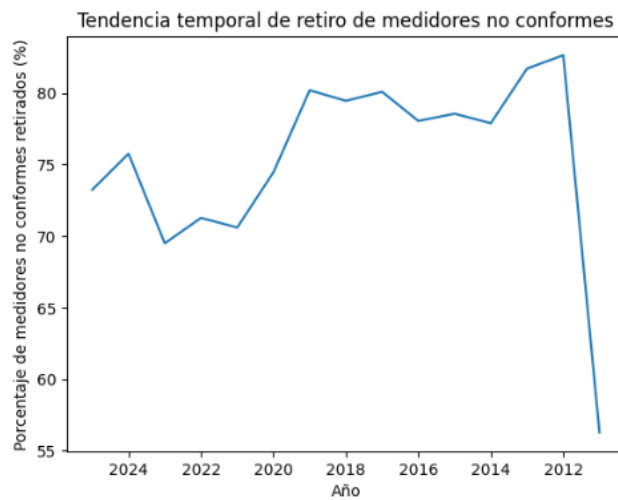
Tendencia temporal del error ponderado promedio.



Nota: Elaboración propia (2026)

Figura 4

Tendencia temporal de medidores retirados no conformes.



Nota: Elaboración propia (2026)

Además, en función de lo anterior, el análisis de resultados se reorientó hacia la evaluación de asociación entre los indicadores metrológicos núcleo, manteniendo coherencia con el objetivo del estudio y con la trazabilidad histórica disponible (2011–2025).

Específicamente, se estimó la relación entre el error ponderado promedio del parque y el porcentaje de medidores no conformes detectados y retirados, como aproximación empírica al comportamiento del sistema acreditado en términos de control metrológico y decisiones operativas de retiro y sus resultados de conformidad. Esta estrategia permite sostener inferencias cuantitativas con base en datos auditables y comparables año a año, conservando el rigor metodológico requerido para una publicación en una revista indexada.

Con los datos consolidados 2011–2025, la asociación entre variables mostró un patrón consistente: se observó una correlación negativa moderada y estadísticamente significativa entre el porcentaje de medidores no conformes retirados y el error ponderado promedio (Pearson $r = -0,589$; $p = 0,021$), y una correlación negativa fuerte bajo un enfoque no paramétrico (Spearman $\rho = -0,836$; $p < 0,001$). En términos interpretativos, estos resultados sugieren que, a medida que aumenta la efectividad del sistema para detectar y retirar y realizar

pruebas en medidores no conformes, tiende a disminuir el error ponderado promedio del parque, lo cual es coherente con la lógica metrológica y operativa del control de subcontaje y la reducción de pérdidas aparentes de agua.

Finalmente, se resalta que esta evidencia no pretende sustituir la inferencia causal propia de un diseño multifactorial, sino presentar resultados empíricos robustos dentro de las restricciones del dato. En ese sentido, la orientación hacia correlación (Pearson/Spearman) constituye una decisión metodológica defensible: mantiene consistencia con el marco teórico, se apoya en registros trazables y aporta hallazgos cuantitativos relevantes sobre el desempeño histórico del parque de medidores bajo un esquema integrado de calibración e inspección acreditadas.

Complemento cualitativo del estudio: análisis experto y validación interpretativa
Con el fin de enriquecer la interpretación de los resultados cuantitativos y aportar profundidad analítica al estudio, se incorporó un componente cualitativo de carácter explicativo-descriptivo, orientado a comprender los mecanismos técnicos, organizacionales e institucionales que subyacen a la relación observada entre el desempeño metrológico e inspección del parque de medidores y la operación del sistema acreditado de calibración e inspección.

Este componente cualitativo no tiene como propósito sustituir la evidencia estadística obtenida, sino contextualizarla, interpretarla y validarla desde la experiencia experta, aportando elementos de sentido que permitan comprender por qué la acreditación conjunta del laboratorio de metrología (ISO/IEC 17025) y del Organismo de Inspección (ISO/IEC 17020) resulta determinante en el control de pérdidas aparentes de agua y en la gobernanza del dato metrológico.

Categoría 1. Complementariedad técnica entre calibración e inspección acreditadas (17025–17020)

En términos sencillos, la 17025 garantiza que el resultado de la medición sea técnicamente sólido: exacto, trazable y con incertidumbre cuantificada. La 17020, en cambio, asegura que la decisión que se toma con base en ese resultado; aceptar, rechazar o cambiar un medidor esté sustentada en criterios objetivos, documentados e imparciales y físicamente visibles en los aparatos.

Dicho de otra forma, la calibración entrega el dato; la inspección acreditada convierte ese dato en decisión formal complementaria. Cuando no existe esa segunda capa institucional, el resultado técnico puede quedar sin efecto operativo. Esto es especialmente evidente en el momento del retiro y reposición del medidor: el informe metrológico por sí solo no cambia el parque si no hay un organismo competente que complemente el dictamen.

En la práctica, la integración 17025–17020 se traduce en decisiones claras y trazables: aceptación sustentada, rechazo con evidencia, retiro sistemático de no conformes y recomendaciones técnicas verificables.

Desde el punto de vista metrológico, es lógico esperar que al retirar medidores con sesgos negativos relevantes disminuya el error ponderado promedio del parque. No es una intuición abstracta; es un ajuste estructural del sistema. La correlación negativa observada empíricamente refuerza esta lectura.

Resumen de la categoría: la acreditación conjunta permite que el dato técnico se transforme en acción operativa consistente, generando efectos medibles en el desempeño metrológico del parque.

Categoría 2. Reducción de discrecionalidad y fortalecimiento de la imparcialidad

Antes de operar bajo esquemas acreditados, las decisiones podían verse influidas, a veces sin intención, por urgencias comerciales, disponibilidad logística o criterios distintos entre áreas. No necesariamente era falta de rigor, sino ausencia de un marco homogéneo obligatorio.

La 17020 cambia ese escenario. Introduce criterios técnicos estandarizados, registros auditables, definición formal de competencias y una separación estructural entre decisión técnica e intereses comerciales. Además, obliga a gestionar explícitamente la imparcialidad.

El efecto es concreto: disminuye la variabilidad subjetiva y aumenta la coherencia del dato en el tiempo. Esto es clave cuando se analizan series históricas largas, como la del periodo 2011–2025.

Resumen de la categoría: la acreditación reduce la discrecionalidad y consolida decisiones homogéneas y auditables, fortaleciendo la consistencia longitudinal del sistema.

Categoría 3. Gobernanza del dato y legitimidad técnica ante terceros

La acreditación no solo certifica competencia técnica; también establece quién custodia el dato y bajo qué condiciones puede usarse. Esto implica trazabilidad documentada, control de versiones, definiciones estables y autorización formal de uso.

Cuando se mezclan datos con distintos niveles de trazabilidad o criterios metodológicos cambiantes, el riesgo no es menor: se compromete la comparabilidad y, en última instancia, la legitimidad científica.

Desde esta perspectiva, la decisión de no aplicar un ANOVA multifactorial no responde a una debilidad conceptual, sino a una postura metodológica coherente con la gobernanza del dato. Se optó por analizar únicamente variables con custodia verificable por organismos acreditados.

Resumen de la categoría: la acreditación protege la integridad y legitimidad del dato, y orienta decisiones metodológicas responsables.

Categoría 4. Innovación institucional y madurez organizacional

Que el Organismo de Inspección de Acuacar sea el primer OI acreditado de una ESP para micromedición en Colombia no es solo un hito formal. Representa la institucionalización del control metrológico, la separación clara entre medición y decisión y la elevación del estándar sectorial.

Mantener un sistema integrado 17025–17020 exige más que procedimientos: requiere talento especializado, infraestructura adecuada, cultura orientada a evidencia, gestión del riesgo metrológico y respaldo directivo sostenido.

El modelo es replicable en su lógica técnica. Sin embargo, su sostenibilidad depende del contexto institucional, los recursos disponibles y el compromiso organizacional.

Más allá del cumplimiento normativo, la acreditación aporta valor estratégico: mejora la gestión del riesgo metrológico, reduce estructuralmente pérdidas aparentes, fortalece la reputación técnica y aumenta la confianza ante terceros.

Resumen de la categoría: la acreditación integrada es una innovación organizacional que eleva el estándar técnico y aporta ventajas estratégicas sostenibles.

Cierre: mecanismo explicativo e implicaciones

En conjunto, los expertos coinciden en un punto central: el impacto en el control de pérdidas aparentes no proviene solo de medir mejor, sino de decidir mejor. La acreditación conjunta convierte sistemáticamente el dato metrológico en decisión operativa objetiva, bajo reglas claras e imparciales.

El retiro estructurado de no conformes, respaldado por calibración acreditada y decisión técnica independiente, ajusta progresivamente el error promedio del parque. La evidencia estadística respalda esta lógica, aunque sin pretender establecer causalidad experimental.

De cara a los próximos 12–24 meses, se recomienda fortalecer auditorías cruzadas entre 17025 y 17020, profundizar análisis predictivos de no conformidad, ampliar cobertura en

segmentos con menor trazabilidad histórica y consolidar un gobierno digital integrado del dato metrológico.

En síntesis, el componente cualitativo no reemplaza la evidencia cuantitativa; la complementa y la explica. Aporta el “por qué” detrás de la relación observada entre retiro de no conformes y mejora del desempeño metrológico, dentro de un sistema acreditado coherente y estructurado.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran una relación negativa consistente entre el porcentaje de medidores no conformes retirados y el error ponderado promedio del parque. En términos prácticos, cuando el sistema detecta y retira con mayor eficacia medidores con sesgos relevantes, el error global tiende a disminuir. Este hallazgo es coherente con la tradición técnica de Arregui et al. (2006, 2018) y con Cordeiro et al. (2022), quienes han defendido que la gestión activa del parque, basada en desempeño real y no solo en edad, es clave para reducir pérdidas aparentes, coincidiendo con la postura de (Belesaca & Astudillo, 2025).

No obstante, este estudio introduce un matiz menos abordado en la literatura: el papel institucional de la inspección acreditada bajo ISO/IEC 17020 como complemento de la ISO/IEC 17025. Mientras la 17025 asegura la validez técnica del resultado, la 17020 formaliza la decisión de conformidad en el aspecto físico. La actualización reciente de ISO/OIML (2024), International Organization of Legal Metrology (2024), ISO/AENOR (2025) y ISO/CEN (2025) y de la serie ISO 4064 (ISO 4064-1-2024; ISO 4064-3-2024; UNE-EN ISO 4064-2-2025) refuerza los requisitos metrológicos internacionales, pero no profundiza en cómo las decisiones institucionales posteriores impactan el desempeño agregado del parque. En ese vacío se ubica el aporte de esta investigación.

Al contrastar estos hallazgos con desarrollos tecnológicos recientes, como el sistema ultrasónico con detección de obstrucciones de Mesmarian, Kharidar y Pishkenari (2025) o los métodos de calibración numérica eficiente en red propuestos por Kołodziej et al. (2024), emerge una tensión interesante. La innovación tecnológica amplía la precisión y la capacidad diagnóstica, pero no sustituye la necesidad de un marco institucional que transforme el dato en decisión trazable. La tecnología mejora la medición; la acreditación estructura la acción.

En el campo de la analítica avanzada, Amaxilatis et al. (2025) proponen imputación para completar series incompletas, mientras que Sierra-García (2025) explora modelos de machine learning para estimar desviaciones y optimizar mantenimiento. Estos enfoques podrían fortalecer futuras investigaciones, aunque dependen críticamente de la calidad y gobernanza del dato. En contextos regulados, como el colombiano, la priorización de información auditada por organismos acreditados puede resultar metodológicamente más defendible que la expansión artificial de series mediante modelamiento.

Existen, sin embargo, límites claros. La correlación observada no prueba causalidad, y otros factores, renovaciones tecnológicas, mejoras en instalación o cambios en perfiles de consumo, podrían influir en la reducción del error. Además, el diseño originalmente multifactorial no pudo materializarse por restricciones en la disponibilidad histórica de datos, lo que obliga a interpretar los resultados con cautela.

En conjunto, la discusión sugiere que la reducción de pérdidas aparentes de agua no depende únicamente de medir mejor, sino de decidir bajo reglas claras, imparciales y acreditadas. La integración ISO/IEC 17025–ISO/IEC 17020 no agota la explicación, pero configura una arquitectura institucional que vincula resultado técnico y acción operativa. En un contexto latinoamericano donde esta articulación ha sido poco estudiada, la evidencia presentada constituye un aporte empírico relevante y abre la puerta a comparaciones futuras con modelos basados exclusivamente en innovación tecnológica o analítica predictiva.

CONCLUSIONES

Este estudio evidencia que, en Acuacar (2011–2025), el aumento en la detección y retiro de medidores no conformes se asocia con una disminución del error ponderado promedio del parque, mostrando coherencia metrológica y operativa con la gestión activa del parque propuesta por Arregui et al. (2006, 2018) y Cordeiro et al. (2022). La principal contribución es demostrar el valor del esquema integrado ISO/IEC 17025–ISO/IEC 17020: no solo mejora la calidad del resultado, sino que convierte el dato en decisión trazable, reduciendo discrecionalidad y fortaleciendo la gobernanza del dato. Aunque la correlación no implica causalidad, los hallazgos aportan evidencia aplicable para el control de pérdidas aparentes de agua.

Declaración de conflicto de intereses

Los investigadores declaran que no existe conflicto de interés relacionado con esta investigación.

Declaración de la contribución del autor

Los autores Javier Alfonso Mendoza Betin, Brahayán Camilo Sierra García, Ferney Jose Arias Caseres: Conceptualización, análisis formal de datos, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, software, supervisión, validación, visualización, redacción – borrador original, revisión y edición.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que la Inteligencia Artificial fue utilizada como una herramienta de apoyo para este artículo, y que dicha herramienta en ningún caso reemplazó la labor o el proceso intelectual. También manifiestan y reconocen expresamente que este trabajo es resultado de su propio esfuerzo intelectual y que no ha sido publicado en ninguna plataforma electrónica de inteligencia artificial.

REFERENCIAS

- Amaxilatis, D., Sarantakos, T., Chatziannakis, I., & Mylonas, G. (2025). Filling in the blanks: Applying data imputation in incomplete water metering data. arXiv.
- Arenas, J. J. T. (2011). Control de calidad en calibraciones realizadas en el laboratorio de medidores de energía y transformadores de EPM bajo NTC-ISO/IEC 17025. *Scientia et Technica*, 17(47), 15–21.
- Arregui, F. J., Cabrera, E., & Cobacho, R. (2006). Integrated water meter management. IWA Publishing.
- Arregui, F. J., Palau, C. V., Ribera, G., & García-Serra, J. (2018). Performance analysis of ageing single-jet water meters. *Water*, 10(5), 612.
- Belesaca, J. D., & Astudillo Salinas, F. (2025). Non-invasive techniques for flow rate measurement in water pipes: Protocol for a systematic review. arXiv.
<https://arxiv.org>
- Brago-Padilla, K. R., & Barajas-Patiño, C. A. (2010). Diseño de propuestas de mejora para los procesos de calibración y ajuste de medidores en el Laboratorio de Medidores de Electricaribe S.A. E.S.P. [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Bolívar].
<https://biblioteca.utb.edu.com>
- CITAC, & EURACHEM. (2002). Guide to quality in analytical chemistry: An aid to accreditation.
<https://www.eurachem.org>
- Cordeiro, C., et al. (2022). A strategy to assess water meter performance. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(5).
- du Plessis, J. A. (2015). Domestic water meter accuracy. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 200.
- Escandón Beltrán, V., & Sierra García, B. (2018). Parámetros metrológicos asociados en la calibración de un medidor de agua potable de clase metrológica R160 15 mm. [Trabajo

de grado, Universidad de Cartagena].

<https://repositorio.unicartagena.edu.com>

Gulfo, R. K. E. (2013). Propuesta de un modelo conceptual en la estrategia de aseguramiento metrológico y gestión de la calidad en empresas de servicios públicos. [Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Bolívar].

<https://biblioteca.utb.edu.com>

Hovany, L. (2012). Error in water meter measuring due to shorter flow and consumption shorter than the time the meter was calibrated.

ICONTEC. (2016). NTC-ISO 4064-1:2016. Medidores de agua potable fría y agua caliente— Parte 1: Requisitos metrológicos y técnicos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

<https://www.icontec.org>

International Organization for Standardization. (2012). ISO/IEC 17020: Conformity assessment—Requirements for the operation of various types of bodies performing inspection. <https://www.iso.org/standard/52994.html>

International Organization for Standardization. (2014). ISO 4064-1: Water meters for cold potable water and hot water—Metrological and technical requirements.

International Organization for Standardization. (2016). ISO 4064-2: Water meters for cold potable water and hot water—Test methods.

International Organization for Standardization. (2017). ISO/IEC 17025: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

<https://www.iso.org/standard/66912.html>

International Organization of Legal Metrology. (2013). OIML R 49: Water meters intended for the metering of cold potable water and hot water.

<https://www.oiml.org>

International Organization of Legal Metrology. (2024). OIML R 49:2024 – Water meters for cold potable water and hot water.

<https://www.oiml.org>

ISO/AENOR. (2025). UNE-EN ISO 4064-2:2025 – Water meters – Test methods.

<https://www.une.org>

ISO/CEN. (2025). ISO 4064-3:2024 – Water meters for cold potable water and hot water – Part 3: Test report format.

<https://www.iso.org>

ISO/OIML. (2024). ISO 4064-1:2024 / OIML R 49-1:2024 – Metrological and technical requirements. <https://www.iso.org>

Karadirek, I. E. (2020). An experimental analysis on accuracy of customer water meters. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 69(1), 18–30.

Karadirek, I. E. (2022). How does ageing of customer water meters affect the metering accuracy? *Water*.

Kołodziej, K., Cholewa, M., Głomb, P., Koral, W., & Romaszewski, M. (2024). Efficient numerical calibration of water delivery network using short-burst hydrant trials. *arXiv*.

<https://arxiv.org>

Mendoza-Betin, J. A., Moncada-Baleta, S., Arias-Cáserez, F., & Ramos-Pacheco, C. (2024).

Análisis de subcontaje y sobredimensionamiento de contadores de agua: ejercicio empírico del Laboratorio de Metrología de Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. *Revista Científica Anfibios*, 7(1), 50–71.

DOI: <https://doi.org/10.37979/afb.2024v7n1.147>

Mesmarian, M., Kharidar, M. M., & Pishkenari, H. N. (2025). Development of a transit-time ultrasonic flow measurement system for partially filled pipes: Incorporating flow profile

correction factor and real-time clogging detection. arXiv.

<https://arxiv.org>

Ncube, M., et al. (2023). Water meter performance in South Africa. Water Research

Commission. <https://www.wrc.org.za>

ONAC. (2025). Certificados de acreditación de laboratorios de medidores 09-LAC-020, 12-LAC-009, 15-LAC-006, 15-LAC-031.

<https://www.onac.org.com>

Palau, C. V., et al. (2011). Metrological performance of single-jet water meters over time. Water SA, 37(4), 567–574.

Sierra-García, B. C. (2025). Estrategias de machine learning para la estimación de desviaciones, consumo y mantenimiento óptimo de medidores de agua potable. [Trabajo de postgrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia].

<https://repository.unad.edu.com>

UNIDO. (2009). Complying with ISO 17025: A practical guidebook for meeting the requirements of laboratory accreditation schemes based on ISO/IEC 17025.

<https://www.unido.org>.