

Metrología 4.0

Desafíos de la transformación digital para la metrología de América Latina y el Caribe

Alexis Valqui
Gabriel Casaburi
Claudia Suaznabar

Sector de Instituciones
para el Desarrollo

División de Competitividad,
Tecnología e Innovación

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-1765

Metrología 4.0

Desafíos de la transformación digital para la metrología de América Latina y el Caribe

Alexis Valqui
Gabriel Casaburi
Claudia Suaznaba

Octubre de 2019

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Valqui, Alexis.

Metrología 4.0: desafíos de la transformación digital para la
meteorology de América Latina y el Caribe / Alexis Valqui, Gabriel
Casaburi, Claudia Suaznabar.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 1765)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Metrology-Technological innovations-Latin America. 2. Information
technology-Latin America. 3. Technological innovations-Latin America.
I. Casaburi, Gabriel G., 1962- II. Suaznabar, Claudia. III. Banco
Interamericano de Desarrollo. División de Competitividad, Tecnología e
Innovación. IV. Título. V. Serie.
IDB-TN-1765

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2019 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

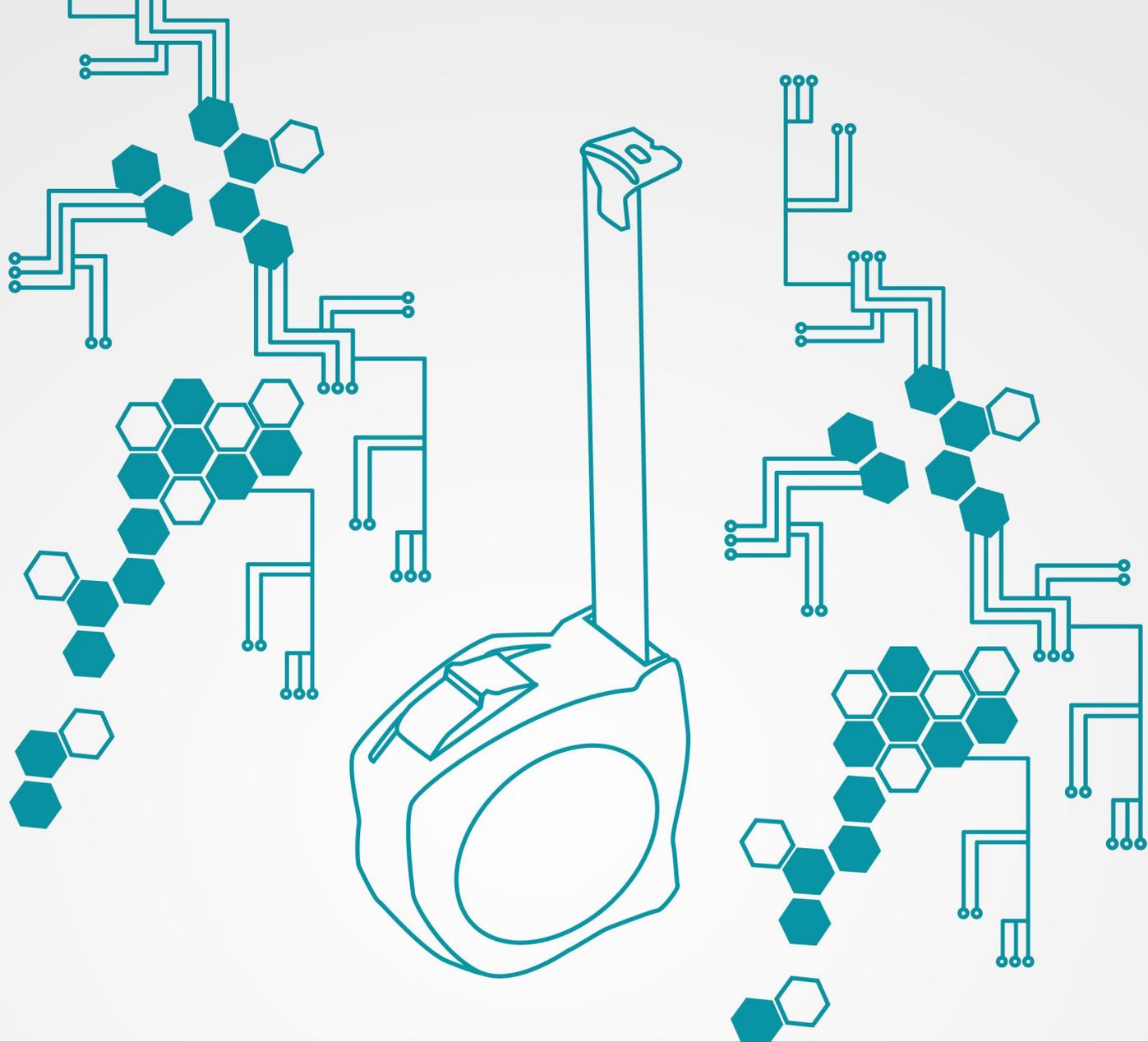
Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Contacto: Gabriel Casaburi , gabrielca@iadb.org.



Metrología 4.0

Desafíos de la transformación digital para la metrología de América Latina y el Caribe

Alexis Valqui
Gabriel Casaburi
Claudia Suaznábar



Resumen

¿Cuál es el rol de la metrología y de los institutos nacionales de metrología (INM) en la transformación digital en América Latina y el Caribe (ALC)? ¿Cómo los INM de la región pueden aprovechar la transformación digital para mejorar sus competencias y sus servicios? ¿De qué manera los INM pueden ser un factor habilitante para la transformación digital en ALC? Esta publicación analiza el rol de la metrología para la transformación digital en general y en especial la situación en ALC con base en una encuesta realizada a 15 INM de la región. Los resultados de la encuesta muestran la brecha existente y creciente entre la demanda de servicios metrológicos 4.0 y el desarrollo de competencias para la transformación digital en los INM. Para enfrentar los desafíos identificados este estudio desarrolla propuestas para los INM de ALC. Como propuestas específicas y de primer paso se identificaron la digitalización de los servicios de calibración y de verificación, el desarrollo de las tecnologías de la información para mejorar la difusión y capacitación ofrecida por los INM y el desarrollo de nubes metrológicas nacionales y regionales. Asimismo, se elaboran propuestas de desarrollo con enfoque regional, por ejemplo, a través del Sistema Interamericano de Metrología (SIM), para apoyar a los INM aprovechando las experiencias existentes y racionalizando los recursos.

Códigos JEL:

L15, N46, O3

Palabras clave:

América Latina, digitalización, gemelo digital, Internet de las cosas, institutos nacionales de metrología, industria 4.0, inteligencia artificial, instrumentos de medición, macrodatos, metrología, metrología 4.0, nube metrológica, realidad virtual, Sistema Interamericano de Metrología, sistemas de medición, transformación digital.

Índice

Agradecimientos	iii
Listado de siglas	iv
1. Desafíos de la transformación digital en América Latina y el Caribe y su impacto en la metrología	1
2. Metrología y transformación digital	10
2.1. La digitalización de los servicios metrológicos	12
2.2. Metrología para asegurar las bases de la transformación digital	23
3. Desafíos y propuestas de desarrollo para los institutos nacionales de metrología en América Latina y el Caribe	34
3.1. Propuestas generales	34
3.2. Propuestas específicas	38
4. Propuestas para fortalecer las competencias de los institutos nacionales de metrología y promover su rol en la transformación digital de la economía y sociedad en América Latina y el Caribe	41
4.1. Actividades de información y sensibilización para todos los INM	42
4.2. Intercambio a nivel regional entre metrólogos, promotores y actores de la transformación digital, y también de la industria	42
4.3. Capacitaciones, asesorías, pasantías e implementación de pilotos para la digitalización de los servicios de calibración, verificación y otros servicios	43
4.4. Desarrollo de las nubes metrológicas a nivel regional	44
4.5. Desarrollo de las capacidades metrológicas de los INM más avanzados para asegurar las bases de la transformación digital	44
4.6. Identificación de aliados, monitoreo conjunto de los avances y evaluación para la inclusión de temas adicionales emergentes	44
Referencias	46
Entrevistas realizadas (2018)	47
Páginas web consultadas	47
Anexo. Nivel de conocimiento (autoevaluación) de los entrevistados en diferentes temas	48

Agradecimientos

Quisiéramos agradecer por los comentarios, aportes y/o sugerencias para lograr este estudio a Ajit Jilla, Al Wavering, Alan Steele, Aldo Quiroga, Andrea Trujillo, Claire Saundry, Claudia Stevenson, Edwin Guillén, Galia Ticona, Galileo Solís, Héctor Laiz, Henry Postigo, Jim St. Pierre, José Dajes, Lars Ahrendt, Luis Mussio, Luz María Ramírez, Matt Scholl, Michael Brinkschroeder, Sascha Eichstädt, Simon Frechette y Ulf Hillner.

Asimismo, quisiéramos agradecer por participar en la encuesta a los siguientes institutos nacionales de metrología: el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Argentina, el Instituto Boliviano de Metrología (IBMETRO) de Bolivia, el Instituto Nacional de Metrología, Calidad y Tecnología (INMETRO) de Brasil, la Red Nacional de Metrología (RNM) de Chile, el Instituto Nacional de Metrología (INM) de Colombia, el Laboratorio Costarricense de Metrología (LACOMET) de Costa Rica, el Centro de Investigaciones de Metrología (CIM) de El Salvador, el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) de Ecuador, el Centro Hondureño de Metrología (CEHM) de Honduras, el Centro Nacional de Metrología (CENAM) de México, el Laboratorio Nacional de Metrología (LANAMET) de Nicaragua, el Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP) de Panamá, el Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN) de Paraguay, el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) de Perú y el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) de Uruguay.

Listado de siglas

ALC	América Latina y el Caribe
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BIPM	Buró Internacional de Pesas y Medidas
CABUREK	Desarrollo de competencias de organizaciones técnicas y científicas a partir de experiencias y conocimientos regionales, metodología (siglas en inglés)
CIPM	Comité Internacional de Pesas y Medidas
IA	Inteligencia artificial
INM	Institutos nacionales de metrología
IoT	Internet de las cosas (siglas en inglés)
Mbps	Megabits por segundo
MIMO	Entrada múltiple, salida múltiple (siglas en inglés)
NIST	Instituto Nacional de Normas y Tecnología, Estados Unidos (siglas en inglés)
NPL	Laboratorio Nacional de Física, Reino Unido (siglas en inglés)
NRC	Consejo Nacional de Investigación, Canadá (siglas en inglés)
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OEA	Organización de los Estados Americanos
PTB	Instituto Nacional de Metrología, Alemania (siglas en alemán)
SIM	Sistema Interamericano de Metrología
TI	Tecnologías de la información
UE	Unión Europea

1. Desafíos de la transformación digital en América Latina y el Caribe y su impacto en la metrología

La metrología es crítica para el buen funcionamiento de una economía. Los mercados de bienes y servicios se desenvuelven dentro de un marco regulatorio e institucional que condicionan su desarrollo. Parte importante de este marco lo constituye todo lo relacionado con la conformidad que los bienes y servicios deben presentar con estándares y requisitos de seguridad, calidad, inocuidad, etc, que protegen a los consumidores y orientan a los productores. Las mediciones confiables son necesarias para lograr una mayor eficiencia de los procesos productivos y calidad de los productos en mercados cada vez más competitivos. También para la transferencia tecnológica, la investigación, el desarrollo de nuevos productos y servicios y la innovación. Asimismo, se precisan las mediciones confiables para mejorar el uso eficiente de los recursos, como por ejemplo de la energía y los programas de eficiencia energética correspondientes, para lograr un monitoreo de parámetros que ayudan a gestionar eficiente y efectivamente sistemas como el del transporte y de los ecosistemas. Las mediciones confiables son necesarias para una medicina cada vez más efectiva y menos invasiva y para proteger al consumidor. Por eso es muy importante analizar el impacto de la transformación digital en la metrología en términos de desafíos y oportunidades, especialmente para afrontar los desafíos que América Latina y el Caribe (ALC) enfrentan en este tema.

Desarrollos recientes en potencia computacional, tecnología y dispositivos móviles, avances en Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), macrodatos (*big data*), inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automatizado (*machine learning*) o realidad virtual junto con nuevos modelos de negocio con base en plataformas y nuevas aplicaciones definen un contexto de hiperconectividad, flujo constante de datos y globalización acelerada.

La nueva economía digital (ED) como resultado de la revolución 4.0 ha traído consigo una velocidad de cambio tecnológico sin precedentes con un impacto transversal en todos los sectores de la economía, modificando cómo interactuamos como sociedad, de qué manera consumimos, cómo los gobiernos se relacionan con sus ciudadanos y de qué forma las empresas producen y hacen negocios (Navarro, 2018). Se puede tomar como ejemplo el sector de energía en el cual el desarrollo de energías renovables, la generación distribuida o las redes inteligentes demandan nuevas capacidades y marcos regulatorios cada vez más apoyados en la generación e intercambio de datos. La sostenibilidad del sector de salud pasa en la actualidad por la atención virtual, como la telesalud y la telemedicina, mientras que la salud móvil (mHealth) y el historial clínico electrónico cada vez generan mayores volúmenes de información de pacientes sujetos de ser analizados para mejorar los procesos de diagnóstico y la efectividad de medicamentos y desarrollos biotecnológicos. En el sector de la construcción la digitalización y el compartir datos entre todos los actores de la cadena de valor permiten también introducir controles regulatorios para asegurar el cumplimiento de la normativa de seguridad y ambiental en las edificaciones y además hacer un mantenimiento predictivo en la fase de operación de hospitales y colegios, con importantes ahorros de costos.

Este nuevo contexto trae consigo desafíos para los hacedores de política industrial y de innovación, los cuales necesitan actualizar tanto el foco como la forma de las intervenciones de política para poder impulsar y acompañar de manera efectiva estos procesos de transformación digital en el tejido productivo de la región de la manera más dinámica e inclusiva posible. La era de la economía digital trae además nuevos retos para los sistemas de calidad de los países, vinculados con la transformación digital de las empresas y las cadenas de valor que ahora exigen nuevas arquitecturas de referencia, estándares y normalización que garanticen la interoperabilidad, como la oportunidad de implementar nuevas tecnologías digitales en la provisión de los servicios de certificación, acreditación y metrología, por ejemplo a través de certificaciones inteligentes, mediciones inteligentes e interconectadas o calibraciones remotas. Esta publicación pretende realizar una primera revisión de las oportunidades y desafíos que la industria 4.0 trae para los organismos de metrología de la región.

Algunos de los principales desafíos que se enfrentan en la región tienen que ver con la generación de datos y de talento, ambos insumos claves para la economía digital. La infraestructura de conectividad y la regulación de los datos en todas sus facetas de privacidad, generación de plataformas de datos abiertos, seguridad y ética son aspectos imprescindibles para poder avanzar en el camino digital. En ambos aspectos la región se encuentra rezagada.

Con respecto a la infraestructura digital, la penetración de banda ancha fija en la región es solo del 10% comparada con un 28% de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE)¹ y la penetración de banda ancha móvil alcanza al 30% de la población en comparación con el 72% de los países desarrollados. Pero no es solo un problema de conectividad, sino también de calidad del servicio. Según datos de Akamai,² la velocidad promedio de las conexiones fijas en países de ALC fue de 4,64 Mbps en 2016 en comparación con 13,14 Mbps de países de la OCDE, y en términos de conexiones móviles existe una brecha similar (3,87 Mbps frente a 10,84 Mbps). Por último, hay un problema de asequibilidad del precio de los servicios de banda ancha: de acuerdo al Índice de Asequibilidad de Banda Ancha calculado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), que mide el porcentaje de los ingresos del 40% de la población de menores ingresos que requiere una conexión básica de banda ancha, los ciudadanos de ALC deben utilizar un 10% de sus ingresos mensuales en servicios de banda ancha fija y móvil en comparación con el 2% y el 3%, respectivamente, en países de la OCDE.

La escasez de talento es otra barrera crucial para la adopción de tecnologías digitales: Cisco estima que en 2019 habrá una brecha de medio millón de profesionales tecnológicos en la región y que en 2025 ascenderá a 1,25 millones solo para programadores. Las empresas latinoamericanas presentan importantes brechas de adopción en muchas de las nuevas tecnologías digitales en comparación con los países de la OCDE. Tecnologías como *big data*, computación en la nube e incluso otras menos sofisticadas, como los sistemas de relacionamiento con clientes (CRM, por sus siglas en inglés), son utilizadas por un porcentaje mucho menor de empresas en comparación con los países de la OCDE. Y las brechas en la digitalización de servicios públicos, grandes demandantes de nuevas soluciones digitales en países desarrollados,

¹ Puede encontrarse esta información en:

<http://www.oecd.org/internet/broadband/lac-digital-toolkit/Data/KeyGraphsonPenetration.htm>

² Más información disponible en: <https://www.akamai.com/es/es/>

son igual de serias. Según un ranking de Naciones Unidas sobre avances de gobierno electrónico, solo cinco países de ALC están entre los 50 más digitalizados del mundo.³

Pero, además, la región no podrá aprovechar las oportunidades de la economía digital si no invierte en las destrezas y capacidades del capital humano, ya sea de gerentes como de niveles técnicos, de las empresas. Asimismo, las empresas tienen la necesidad de actualizar sus inversiones tecnológicas, en un contexto en el cual la velocidad del cambio les dificulta estar al día con las nuevas tecnologías, aplicaciones o proveedores existentes y con los potenciales beneficios para la estrategia u operación de sus negocios.

Adicionalmente a los desafíos internos de las empresas, la revolución 4.0 implica un cambio general en toda la cadena de valor, en la manera en que clientes y proveedores se relacionan entre sí en cada eslabón, de forma tal que hay una porción importante de la transición hacia el mundo 4.0 que las firmas no controlan totalmente, ya que es parte esencial del proceso de comunicación con el resto del aparato productivo y la clientela. En este punto es crítica la decisión sobre estándares y normas que permitan la interoperabilidad para que los procesos de digitalización se extiendan por fuera de cada empresa individual y afecten su relación con el resto de la cadena de valor, sus pares y las agencias públicas y privadas de apoyo a la producción.

En la mayoría de los países avanzados el sector público está llevando adelante un conjunto de políticas para apoyar la transformación digital de su sector productivo. Estas se orientan tanto a habilitar los cambios, como a acelerarlos y difundirlos entre la mayor cantidad de actores posibles, de manera de acompañar el proceso que los mercados van delineando. Alemania ha sido el primer país que ha desarrollado una estrategia nacional para fomentar la transformación digital de la industria. Como resultado del Plan de Acción de la Estrategia de Alta Tecnología 2020 del gobierno alemán, en 2013 se creó la plataforma Industria 4.0⁴ para asegurar y mejorar la competitividad de la industria de ese país. Esta plataforma tiene grupos de trabajo sobre arquitecturas de referencia, estándares y normalización, seguridad en sistemas interconectados, marco regulatorio, trabajo y capacitación, escenarios de tecnología y aplicaciones y modelos de negocio digitales en la industria 4.0. El Instituto Nacional de Metrología de Alemania (PTB, por sus siglas en alemán) se ha integrado al grupo de trabajo sobre arquitecturas de referencia, estándares y normalización.

En ALC hay un avance en el despliegue de agendas de transformación digital, pero estas tienen un fuerte énfasis en gobierno digital y poco en los desafíos que enfrentan los sectores productivos.⁵ Destacan en la región ejemplos de intervenciones de política recientes en Brasil como la Estrategia E-Digital y el Grupo de Trabajo Industria 4.0 (GTI 4.0) que, al estilo de la Plattform Industrie 4.0 de Alemania, convocó a un gran número de instituciones del gobierno, las

³ Puede encontrarse la información en <https://publicadministration.un.org/egovkb/Data-Center>

⁴ Por industria 4.0 se entiende la interconexión inteligente de máquinas y procesos con ayuda de las tecnologías de la información y comunicación. A través de esta interconexión las empresas pueden flexibilizar la producción, dinamizar las fábricas, desarrollar soluciones focalizadas en los clientes, optimizar la logística, aprovechar los datos de la producción para nuevas áreas de negocio y mantenimiento predictivo, y lograr la economía circular de los recursos.

⁵ Una publicación de la OCDE (2016) recoge datos acerca de la Encuesta sobre Desempeño del Gobierno Digital de la OCDE-BID 2015 para ALC. Allí se estima que el 73% de los países de ALC han desarrollado una estrategia digital, y en el 70,6% de los casos estas reciben financiamiento de ministerios encargados de coordinarlo.

empresas y la sociedad civil, para generar consensos y armar una agenda de transformación digital para la industria brasileña.⁶ Por su parte, en Chile la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) lanzó como parte de su Programa Transforma, la iniciativa de industrias inteligentes. Se trata de una instancia de coordinación entre el sector privado, la academia y los centros de investigación, el gobierno y la comunidad para el mejoramiento competitivo a través de la incorporación de soluciones tecnológicas sofisticadas en sectores productivos importantes de la economía chilena.

En este contexto de urgencia y necesidad de cambios, la División de Competitividad e Innovación (CTI, por sus siglas en inglés) del BID viene impulsando una nutrida agenda de transformación digital que busca generar evidencia y capacidades en los hacedores de política de la región para poder seguir siendo relevantes en las nuevas condiciones. Esta publicación busca aportar a esta discusión identificando de qué manera pueden los institutos nacionales de metrología (INM) contribuir a la transformación digital que está viviendo el sector productivo en ALC. La razón de centrar un estudio en los INM de la región se basa en la importancia que tienen para asegurar las mediciones confiables para el sector productivo, la economía y la sociedad en general.

Los INM deben ser parte de la transformación digital aprovechando tanto el potencial que tienen las tecnologías digitales para mejorar y facilitar sus funciones y servicios, como actualizando su abanico de servicios para hacerlo más relevante a las necesidades de la industria 4.0. Con respecto a lo primero, esta publicación analiza la forma en que los INM de la región pueden aprovechar y están aprovechando los potenciales que brindan las tecnologías digitales para mejorar la gestión de los procesos y de los datos e información que producen, tales como los valores, la incertidumbre y las condiciones de las mediciones. También examina cómo con la digitalización de los servicios metrológicos, la metrología legal y las funciones de los INM en general estos pueden multiplicar su impacto sobre el sector productivo. El análisis también incluye las formas de aprovechar la posibilidad de poner los datos e información de las mediciones realizadas en línea o en una nube metrológica de acceso directo pero diferenciado. Es decir, cómo los INM pueden poner a disposición los resultados de mediciones de forma más confiable, más expedita, más exacta, más eficiente y en línea para que se puedan tomar decisiones realmente informadas y en tiempo real en los diferentes niveles de acción.

Con respecto a lo segundo, esta publicación analiza de qué manera los INM pueden ser un factor habilitante para la transformación digital y cómo están contribuyendo a esto en la región. El estudio está enfocado en la metrología para asegurar las bases tecnológicas de las comunicaciones, en la dinámica tecnológica de los instrumentos hacia medidores inteligentes y sistemas de medición, y en las exigencias crecientes de mediciones cada vez más complejas, más exactas y disponibles en tiempo real e in situ. Asimismo, analiza el rol de la metrología en *big data* y la IA, y el potencial de las mediciones virtuales y simulaciones. Un tema transversal es el de la ciberseguridad, crucial para los INM, ya que sin ella no pueden cumplir el rol de proveedores de mediciones confiables. Es decir, se estudian las competencias que los INM deben desarrollar para que los datos e información sobre mediciones generada por diferentes actores puedan ser la base para una toma de decisión cada vez mejor informada, descentralizada y automatizada.

⁶ Para más información, visítase: www.industria40.gov.br

Resulta evidente que la transformación digital también va a iniciar un proceso de transformación de la metrología en sí misma. Se esperan cambios en los conceptos metrológicos y en el rol de los INM, que no se profundizarán en este estudio porque todavía es bastante prematuro abordarlo, pero que abren oportunidades a nuevos estudios que puedan construir al respecto.

Esta publicación se basa en la información y opiniones recabadas en un taller de intercambio y análisis realizado en marzo 2018 en Bogotá con representantes del Consejo del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y del BID, así como en una encuesta realizada entre abril y junio de 2018 a los INM de ALC. Las encuestas se enviaron a los INM de 17 países de la región, de los cuales 15 respondieron. Los INM que participaron son de Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú y Uruguay. El análisis de las encuestas se realizó como una estadística descriptiva, ya que por el tamaño de las muestras no se realizó ningún análisis estadístico matemático.

2. Metrología y transformación digital

Los procesos de transformación digital que atraviesan todos los sectores productivos afectan de manera muy directa a la metrología, tanto porque le permiten organizarse de otra forma para prestar sus servicios (parte del campo de la tecnología de las regulaciones o *regtech*), como porque los mismos servicios que presta deben transformarse para adaptarse a la realidad y necesidades de la industria 4.0. Así como Alemania es líder en un conjunto de sectores manufactureros desde hace décadas, su instituto nacional de metrología, el PTB, también tiene un liderazgo global entre los institutos metroológicos del mundo. Y de la misma forma, así como Alemania es uno de los líderes a nivel mundial de las iniciativas de industria 4.0, el PTB lo está haciendo en términos de su equivalente: la metrología 4.0.

Para analizar los desafíos de la transformación digital y de la implementación de la estrategia industria 4.0 y decidir cómo enfrentarlos como INM, el PTB de Alemania publicó *Metrología para la digitalización de la economía y la sociedad en 2017* (PTB, 2017a). Este estudio del PTB se basa en el análisis de sus capacidades, de las necesidades de sus clientes y de las iniciativas en estos temas de sus pares que también están en la vanguardia, como el Instituto Nacional de Normas y Tecnología de los Estados Unidos (NIST, por sus siglas en inglés). El PTB ha definido cuatro temas principales en su estrategia; transformación digital de servicios metroológicos, metrología en el análisis de *big data*, metrología de los sistemas de comunicación para la digitalización y metrología para simulaciones e instrumentos de medición virtuales. Estas iniciativas son apoyadas por tres proyectos transversales: nube metroológica, certificado de calibración digital y experimentos virtuales y metrología basada en matemáticas (PTB, 2017a). Adicionalmente el PTB ha creado el grupo de trabajo Coordinación de la Digitalización que interconecta de forma organizacional y técnica los laboratorios del PTB en los asuntos de la digitalización, representa al PTB externamente en estos temas y analiza los potenciales de los desarrollos de la digitalización.⁷

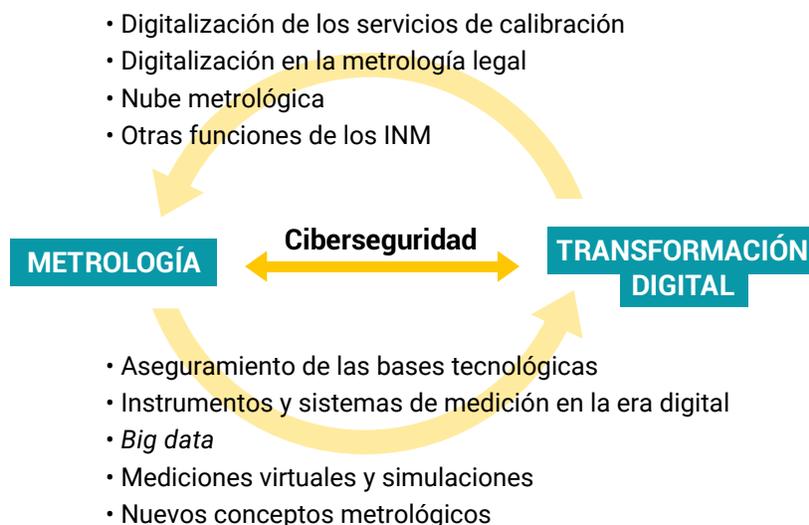
Otros INM que se mantienen en la frontera de la innovación, como NIST de los Estados Unidos, el Consejo Nacional de Investigación (NRC, por sus siglas en inglés) de Canadá y el Laboratorio Nacional de Física (NPL, por sus siglas en inglés) del Reino Unido, tienen avances y desarrollos considerables en varios temas relacionados a la transformación digital aunque no han desarrollado una estrategia especializada o tan integral como la del PTB. Por ejemplo, el NPL, en su *Visión de la Metrología para los 2020s* define dos de los cuatro grandes temas para la década de 2020 con base en los desafíos de la transformación digital: mediciones inteligentes e interconectadas (tema 3) y mediciones integradas y ubicuas (tema 4) (NPL, 2013).

La presente publicación organiza el análisis del impacto de la transformación digital para la metrología alrededor de dos ejes centrales: (i) la digitalización en la metrología potencia y multiplica su impacto y abre nuevas posibilidades de desarrollo e innovación metroológica; y (ii) la metrología como base de la transformación digital, es decir, como proveedora de un

⁷ Para más información, visítase www.ptb.de

conjunto de servicios habilitantes que permiten y/o aceleran la transformación digital de las firmas. Dentro de cada uno de estos ejes se analizan distintos aspectos específicos. Bajo el primero se analizan (a) la digitalización de los servicios metrológicos; (b) la digitalización de la metrología legal; (c) la potencialidad de una nube de acceso diferenciado; y (d) el impacto de la digitalización en el resto de funciones de los INM (gráfico 1).

Gráfico 1. **Metrología y transformación digital**



Fuentes: Elaboración propia.

Dentro del segundo eje, que analiza el rol de la metrología como factor habilitante de la industria 4.0, se discuten los siguientes aspectos: (a) el uso de la metrología para asegurar las bases tecnológicas de las comunicaciones; (b) el rol de los instrumentos y sistemas de medición en la era digital; (c) metrología y *big data*; (d) el papel de las mediciones virtuales y las simulaciones; y (e) el desarrollo de conceptos metrológicos. Además, se trata el tema de la ciberseguridad.

Adicionalmente, se espera que la metrología también sea parte de un proceso de transformación en sí misma. Esta transformación conllevará cambios en los conceptos metrológicos y en el rol de los INM, entre otros. En esta publicación, se tematizarán puntualmente los potenciales de transformación de la metrología, pero no se profundizarán dado que todavía es bastante prematuro para abordar estos temas.

2.1. La digitalización de los servicios metrológicos

Bajo este primer eje se cubren los servicios metrológicos ya existentes y que pueden ser potenciados a través de la digitalización y los instrumentos de las tecnologías de la información (TI). Por eso puede ser visto como uno de los primeros pasos para iniciar con los INM de ALC el tema de la transformación digital y la metrología. En el análisis se vislumbran muchos impactos positivos, pero la transformación digital también puede ser vista como un riesgo para los INM, especialmente para los que no se puedan adaptar a las nuevas necesidades y realidades tecnológicas. Un INM que actualmente ofrece trazabilidad en una magnitud, pero que no puede calibrar los nuevos instrumentos de medición con componente digital o no puede dar servicios de calibración de forma remota, ya no tendría –a pesar de contar con los patrones nacionales– la capacidad técnica de cubrir todas las necesidades metrológicas en caso de que este tipo de calibraciones sea demandado por la industria.

En este apartado se analizan cuatro aspectos de la digitalización de los servicios metrológicos: la digitalización de los servicios de calibración, la digitalización en la metrología legal, la nube metrológica y la digitalización de otros servicios y funciones de los INM.

2.1.1. La digitalización de los servicios de calibración

Mediante la digitalización y la automatización de los servicios de calibración existentes y del monitoreo y control ambiental de los laboratorios, los INM pueden en primera instancia mejorar la productividad en sus procesos y optimizarlos. Por ejemplo, la toma de datos del instrumento y la medición se apoya en un banco de datos, código de barras y sensores; la interpretación de los resultados, la estimación de la incertidumbre y la emisión del certificado se basan en un programa informático; el control ambiental de los laboratorios es manejado y registrado automáticamente y los datos ambientales alimentan la interpretación de los resultados (véase el recuadro 1). Esto junto con la atención de los clientes a través de una plataforma digital puede mejorar la calidad en la prestación de los servicios.

A través de la digitalización los INM podrán liberarse de una parte de la carga de trabajo y utilizar su competencia técnica para el desarrollo de nuevas magnitudes, nuevos métodos de medición y/o nuevos servicios.

Al digitalizar y automatizar los propios procesos en las diferentes magnitudes, los INM ganan conocimiento y experiencia y pueden desarrollar las competencias necesarias para ser interlocutores interesantes para los sectores económicos que se encuentran en el proceso de transformación digital. Asimismo, podrán ir almacenando de forma automatizada datos que pueden utilizarse como base para modelos y simulaciones metrológicas, en la nube metrológica y en *big data*.

Otro tema a ser considerado es la calibración de instrumentos con componente digital. Cada vez más los instrumentos de medición tienen al menos un indicador digital y no son análogos, como los termómetros. Algunos no solo tienen un indicador digital, sino que indican los valores con base en un tratamiento automatizado de los datos. De las conversaciones al respecto con representantes de los INM durante la preparación de esta publicación, queda la impresión de que varios INM calibran instrumentos de medición con componente digital, pero sin evaluar ese componente y, por ende, sin proveer una real calibración a este tipo de instrumentos.

Recuadro 1. El laboratorio Perschmann Calibration

El laboratorio Perschmann Calibration es un buen ejemplo de las posibilidades de la digitalización en los laboratorios de calibración.

El laboratorio fue establecido en 1993 y en el mismo año obtuvo la primera acreditación para los servicios de calibración de bloques patrón. En la actualidad ofrece servicios de calibración no solo en el área dimensional, sino también en las áreas de temperatura, electricidad, magnitudes mecánicas, y en tiempo y frecuencia. Tiene más de 140 colaboradores y realiza en promedio 3.000 calibraciones al día. Gracias a la optimización y automatización de sus procesos la empresa logra trabajar los encargos de hasta 100 instrumentos de medición en un periodo de tres a cinco días.

La gestión de la información en el laboratorio se realiza de forma digital. Un principio que rige en la empresa es que los datos concernientes a cada instrumento de medición que entra al laboratorio es introducido solamente una vez en el sistema, si es necesario de forma manual. Los datos pueden ser sobre el cliente, las características técnicas del instrumento de medición y el encargo. A cada instrumento se le adjudica un número de identificación único en el sistema. Este se maneja a través de un código de barras, el cual se lee en cada estación del proceso de manera de poner a disposición del operario automáticamente la información que necesita sobre el instrumento.

Para cada tipo de instrumento se desarrolla un procedimiento de calibración. En la estación de medición se identifica el instrumento a través del código de barras y el programa en la computadora le indica al metrólogo el punto de medición. El metrólogo realiza la medición e introduce los resultados obtenidos en el sistema o activa la toma de datos automática. Paso a paso se miden los puntos que indica el sistema. Después de finalizar las mediciones, el sistema elabora el certificado que el cliente escogió. Para el envío de los datos, los clientes pueden elegir entre un certificado impreso, uno enviado por correo electrónico o uno puesto a disposición a través de Internet. Actualmente están desarrollando el certificado con firma digital.

Desde 1999 el laboratorio ofrece un programa informático llamado trendic®, que puede apoyar a los clientes en gestionar sus instrumentos de medición (conforme con los requisitos de auditoría), encontrar los informes de calibración, monitorear los tiempos de calibración, elaborar el encargo de calibración, determinar las necesidades de calibración según intensidad de uso y realizar calibraciones internas. El laboratorio le ofrece al cliente identificar sus instrumentos mediante un código Datamatrix, lo que le facilita al cliente la gestión de sus instrumentos. Con el programa informático y el código el laboratorio optimiza la comunicación y la fidelización de los clientes.

Los procesos de optimización y automatización que ha realizado internamente la empresa se basan en el conocimiento y la experiencia de sus colaboradores y, en parte, en el de consultores externos. Estos procesos siguen siendo desarrollados consecuentemente por los colaboradores. Las posibilidades de automatización dependen más de las técnicas de medición o de la colocación del instrumento en el puesto de medición que de las magnitudes. El beneficio de la automatización depende también del número de instrumentos a calibrar. Para la calibración de grandes cantidades de calibres, galgas y relojes de comparación el laboratorio ha conectado una máquina de tres coordenadas con un brazo de robot KUKA. Este es probablemente el primer proyecto para utilizar la robótica en la calibración de instrumentos en forma masiva.

Fuente: Texto elaborado con base en las visitas al laboratorio y en la entrevista a Lars Ahrendt (2018).

La situación en ALC

El primer aspecto consultado en la encuesta fue sobre el estado actual de desarrollo (en 2018) y el estado de desarrollo esperado a 2025 con respecto a la digitalización de los servicios de calibración de los INM. En este sentido se realizaron preguntas en los siguientes cuatro temas:

- i. digitalización y automatización de los procesos de calibración;
- ii. digitalización y automatización del monitoreo y control ambiental en los laboratorios;
- iii. plataforma digital de atención al cliente;
- iv. servicios de calibración de instrumentos con componente digital.

En 2018 dos tercios de los INM entrevistados manifestó tener los primeros desarrollos o procesos de calibración digitalizados y automatizados (cuadro 1).

Casi dos tercios de los INM entrevistados declaró tener la mayoría o todos los laboratorios con monitoreo y control ambiental digitalizado y automatizado. Este tema es el más avanzado en lo que respecta a la digitalización de los servicios metroológicos.

Una quinta parte de los INM entrevistados afirmó no tener nada desarrollado para la atención digital del cliente, y otro quinto aseguró que no tenía servicio de calibración de instrumentos de medición con componente digital. Este último tema parece ser el menos avanzado en lo que respecta a la digitalización de los servicios de calibración, a pesar de que cada vez más estos instrumentos están entrando al mercado.

Cuadro 1. Autoevaluación del estado actual de desarrollo (2018) y del esperado para 2025 con respecto a la digitalización de los servicios de calibración de los INM

Tema	N	Estado de desarrollo					
		Actual (2018)			Esperando a 2025		
		I	II	III	I	II	III
Porcentaje de los encuestados							
Digitalización y automatización de los procesos de calibración	15	7%	73%	20%	0%	20%	80%
Digitalización y automatización del monitoreo y control ambiental en los laboratorios	15	13%	33%	53%	0%	20%	80%
Plataforma digital de atención al cliente	15	20%	40%	40%	0%	13%	87%
Servicios de calibración de instrumentos con componente digital	15	20%	53%	27%	0%	20%	80%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I: nada digitalizado o implementado; II: primeros desarrollos o procesos digitalizados o implementados; III: la mayoría o todos los procesos digitalizados o servicios implementados.

Para 2025 los INM entrevistados aspiran a dar un salto en el desarrollo y todos esperan contar con, al menos, primeros desarrollos en los cuatro temas. Más de cuatro quintos de los INM esperan contar para ese año con la mayoría o todos los procesos implementados, tanto para la plataforma digital de atención al cliente, como para el monitoreo y control ambiental digitalizados y automatizados en los laboratorios.

El nivel de desarrollo esperado de la digitalización de los servicios de calibración en promedio para 2025 es relativamente alto.

Esta información se complementa con los resultados del taller Café Mundial realizado con el Consejo del SIM en Bogotá. La visión de la situación esperada en ALC para 2025 sobre este tema definida en el taller incluyó: servicios de calibración para sensores integrados; calibraciones completamente automatizadas; calibraciones remotas; servicios de calibración, verificación y validación integrados en los procesos productivos; estandarización e interoperabilidad de los formatos de datos; y certificados de calibración digitalizados, que incluyen los coeficientes de sensibilidad y datos para la modelación.

Como primeros pasos para avanzar hacia esa visión se nombraron en el taller los entrenamientos en automatización de procesos de calibración, la realización de estudios pilotos, los eventos de sensibilización sobre buenas prácticas existentes y la transferencia de conocimiento en todos los aspectos.

2.1.2. La digitalización en la metrología legal

Mediante la digitalización y la automatización de los servicios y del monitoreo y control ambiental durante la prestación del servicio se puede lograr una mejora en la productividad de los procesos de verificación. Además, la digitalización en metrología legal optimiza la atención de los clientes y usuarios a través de procesos ágiles y oportunos, a la vez que facilita información a las autoridades y público en general.

Por la enorme cantidad de medidores de consumo de agua, electricidad, gas y otros instalados, así como de balanzas y dispensadores de gasolina en los mercados y gasolineras, la carga de trabajo para los INM, que por mandato ejecutan las verificaciones iniciales y/o periódicas, es grande. Con la digitalización y automatización de los servicios las mejoras de productividad pueden ayudar a liberar muchos recursos en los laboratorios y/o lograr una mayor cobertura con las instalaciones existentes.

Al digitalizar y automatizar sus procesos de verificación los INM ganan conocimiento y experiencia para profundizar en la temática. Asimismo, pueden ir almacenando de forma automatizada datos que pueden ser utilizados como base para modelos y simulaciones metrológicas en la nube metrológica (véase el apartado 2.1.3.) y en *big data*. Todo esto ayudará a desarrollar nuevos instrumentos y formas más eficientes y efectivas para implementar la reglamentación técnica, evaluar la conformidad y tener una mejor base de análisis de riesgo para la vigilancia de mercado.

El rol de la metrología legal es asegurar a todos los actores que los instrumentos de medición en los cuales se basan las transacciones comerciales y las decisiones en el área de salud, transporte y medio ambiente estén midiendo confiablemente y cumpliendo con las tolerancias especificadas.

Lo ideal sería poder contar con un sistema que ofrezca de forma automatizada la información correspondiente al actor que lo necesite en tiempo real y de manera confiable. Aparatos y medidores inteligentes, banco de datos digitalizados, conexiones de Internet potentes, aplicaciones en dispositivos móviles son algunas de las condiciones para ello. Las estadísticas basadas en *big data* pueden ayudar a identificar anomalías, incluido el fraude, en las mediciones realizadas en el sistema.

Asimismo, se podrían identificar más fácilmente los puntos de riesgo y orientar el control hacia ellos. Con la digitalización y automatización de los procesos de verificación se podría construir este sistema de mejor manera. Aplicando IA se podrá apoyar el aprendizaje del sistema para desarrollar algoritmos que ayuden a detectar anomalías en el sistema.

Actualmente muchos medidores ya tienen un componente digital y la entrada de los medidores inteligentes al mercado latinoamericano ya empezó. De las conversaciones al respecto con representantes de los INM, queda la impresión, al igual que con los servicios de calibración de instrumentos con componente digital, que varios INM verifican los medidores de consumo con componente digital, sin evaluar realmente ese componente. En la verificación esto es más grave porque se podría dar el caso en que medidores de consumo sean manipulados para favorecer a un grupo de actores en el mercado. Los temas de seguridad de datos aquí son más críticos, enfatiza también el anterior Presidente del SIM (Laiz, 2018).

La proliferación de medidores inteligentes ya en curso, así como de medidores con componente virtual en el futuro, harán aún más crítica la brecha tecnológica entre lo que se utiliza en el mercado y lo que los INM pueden ofrecer. El ex Presidente del SIM hace hincapié en lo crítico de esta brecha.

La situación en ALC

En la encuesta el segundo aspecto consultado fue el estado actual de desarrollo (2018) y del estado de desarrollo esperado a 2025 con respecto a la digitalización en la metrología legal. En este sentido, se especificaron preguntas en los siguientes siete temas:

- i. digitalización y automatización de los procesos de verificación en los laboratorios de la autoridad central metrología;
- ii. documentación y monitoreo en línea de los servicios de verificación in situ;
- iii. servicios de consulta y validación de certificados en línea;
- iv. servicios de verificación de instrumentos con componente digital (*software*);
- v. servicios de aprobación de modelo de instrumentos con componente digital (*software*);
- vi. servicios de verificación de medidores inteligentes;
- vii. servicios de aprobación de modelo de medidores inteligentes.

Diez de los 15 INM entrevistados cumplen la función como autoridad central metrología en su país o como parte de ella. Cuatro INM se abstuvieron de responder las preguntas sobre la metrología legal.

Cuadro 2. Autoevaluación del estado actual de desarrollo (2018) y del esperado para 2025 con respecto a la digitalización en la metrología legal

Tema	N	Estado de desarrollo					
		Actual (2018)			Esperando a 2025		
		I	II	III	I	II	III
Porcentaje de los encuestados							
Digitalización y automatización de los procesos de verificación en los laboratorios de la autoridad central metrología	8	13%	88%	0%	0%	25%	75%
Documentación y monitoreo en línea de los servicios de verificación in situ	11	18%	73%	9%	0%	27%	73%
Servicios de consulta y validación de certificados en línea	11	36%	55%	9%	0%	18%	82%
Servicios de verificación de instrumentos con componente digital (<i>software</i>)	11	45%	45%	9%	18%	36%	45%
Servicios de aprobación de modelo de instrumentos con componente digital (<i>software</i>)	11	45%	45%	9%	18%	45%	36%
Servicios de verificación de medidores inteligentes	10	80%	20%	0%	30%	30%	40%
Servicios de aprobación de modelo de medidores inteligentes	10	70%	30%	0%	30%	30%	40%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I: nada digitalizado o implementado; II: primeros desarrollos o procesos digitalizados o implementados; III: la mayoría o todos los procesos digitalizados o servicios implementados.

En el campo de la metrología legal la mayoría de los INM que contestaron estas preguntas cuentan en la actualidad con primeros procesos de verificación digitalizados y automatizados, así como con primeros procesos implementados para documentar, monitorear, consultar y validar en línea con base en un banco de datos (cuadro 2). Para el año 2025 la mayoría espera que estos procesos alcancen un mayor grado de implementación, es decir, confían en tener la mayoría o todos estos procesos digitalizados. Todos esperan tener algo ya implementado.

Por su parte, la mayoría de los INM que contestaron estas preguntas no tiene servicios de verificación y de aprobación de modelo ni para instrumentos de medición con componente digital ni para medidores inteligentes. Para el año 2025 un tercio espera seguir sin poder ofrecer servicios para los medidores inteligentes. Un tercio confía en tener primeros servicios implementados para medidores inteligentes y solo un tercio espera tener la mayoría o todos los servicios implementados para medidores inteligentes. Aunque no tan marcado, el desarrollo de los servicios para instrumentos con componente digital tiene una expectativa similar.

Esta información se complementa con los resultados del taller Café Mundial realizado con el Consejo del SIM en marzo 2018 en Bogotá. La visión de la situación esperada en ALC para 2025 sobre este tema definida en el taller incluyó: una nube metrológica que contiene temas e información de regulación y aprobación de modelo de instrumentos de medición, y también una función de alertas para cada tipo de instrumento regulado y para cada instrumento; la posibilidad de que se maneje la parte digital de algunos instrumentos de medición en la nube metrológica; la gestión de periodos variables de verificación; y la implementación de códigos Datamatrix en los instrumentos de medición regulados.

Como primeros pasos para avanzar hacia esa visión se nombraron en el taller: entrenar en ciberseguridad, fortalecer el equipamiento e infraestructura, capacitar al personal, mejorar las regulaciones y conformar comités para coordinar prioridades y capacidades.

2.1.3. Nube metrológica de acceso diferenciado

La finalidad de la metrología es lograr la comparabilidad y confiabilidad de las mediciones. Para ello, los INM producen información sobre los instrumentos de medición y las mediciones. Para que la metrología tenga efecto, esta información debe estar disponible de forma transparente, confiable y fácilmente accesible para el usuario. A su vez, para lograr la comparabilidad internacional los INM tienen la necesidad de intercambiar y compartir información a nivel regional e internacional. El banco de datos (KCDB, por sus siglas en inglés) del Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) con las capacidades de medición y calibración de los INM es un ejemplo actual. En el futuro será la nube metrológica la herramienta ideal para potenciar el impacto de la metrología y de los INM. En el caso de la Unión Europea (UE) los INM han iniciado el desarrollo de la nube metrológica europea (véase el recuadro 2).

A nivel nacional, junto a las nubes metrológicas nacionales manejadas por los INM puede ser interesante para las empresas, grupos de empresas y asociaciones crear sus propias nubes metrológicas. Para facilitar el desarrollo de estas nubes, así como para garantizar su rendimiento, seguridad, confiabilidad e integración, se debe contar con arquitecturas de referencia, desarrolladas y ofrecidas por los INM.

Recuadro 2. La nube metrológica europea

Para dar respuesta a la transformación digital en el área de la metrología legal y en apoyo a la estrategia para un mercado único digital para Europa, un consorcio que incluye a importantes institutos nacionales de metrología de esa región ha empezado a desarrollar la nube metrológica europea. Esta nube estará basada en plataformas confiables en cada Estado miembro, diseñadas para apoyar y alinear los procesos regulatorios a través de la complementación de las infraestructuras y bases de datos existentes, que ofrezcan a los usuarios un único punto de entrada. Esta nube garantizará interoperabilidad y los niveles de seguridad serán adaptables a las necesidades. Los INM proveerán una administración confiable, asegurando mantener la figura de socio imparcial y el rol de ancla de confianza en el sistema que siempre han cumplido. La nube será desarrollada siguiendo el principio de mínimos, pero empleando rigurosos estándares y protocolos y una máxima libertad de implementación que favorecerá la participación de un gran número de actores.

Gráfico 2. El concepto de una plataforma metrológica confiable



Fuente: Thiel (2018).

Notas: ICSMS: siglas en inglés para Sistema de información y comunicación de la vigilancia de mercado; IM: instrumento de medición.

Con la nube se desarrollarán arquitecturas de referencia que ayudarán a manejar la información cada vez más compleja y asegurarán al sistema contra riesgos y peligros. En la nube se contará con representaciones digitales de los instrumentos de medición, también llamados gemelos digitales. El gemelo digital contendrá información sobre el tipo de instrumento y sobre el instrumento en particular. Además, recolecta, evalúa y disemina datos, e inicia acciones si ciertas condiciones están dadas. Con esto se crearán las bases para la reparación y verificación digital remota. Al conectar las bases de datos será posible contar con la información sobre los 1.000 millones de instrumentos utilizados en el mercado de la UE en una sola plataforma o lago de datos metrológicos. El lago contendrá información sobre las mediciones, administrativa y sobre los servicios realizados. Además, aplicando entre otros la IA se espera desarrollar servicios de datos inteligentes. En un primer paso, se está pensando en usar los datos para reforzar la vigilancia de mercado e iniciar el uso de contratos inteligentes en la metrología legal.

Fuente: Texto elaborado con base en Thiel (2018).

La situación en ALC

Como parte de las consultas sobre la metrología legal, en la encuesta se preguntó acerca del estado actual de desarrollo (2018) y del estado de desarrollo esperado a 2025 con respecto a la nube metrológica de acceso diferenciado para la gestión de la metrología legal (incluyendo las regulaciones, aprobación de modelo, la información de cada instrumento en uso y alarmas).

Especialmente la metrología legal podría beneficiarse de una nube metrológica. Así, países que no tienen capacidad técnica para realizar ciertas mediciones podrían fácilmente utilizar y aprovechar la información generada en otros países sobre los instrumentos de medición que les interesan.

El 60% de los INM encuestados declararon tener primeros procesos digitalizados como base de una nube metrológica para la gestión de la metrología legal y el 60% espera tener para 2025 la mayoría o todos los procesos implementados para la gestión de la metrología legal apoyados en una nube metrológica (cuadro 3).

Cuadro 3. Autoevaluación del estado actual de desarrollo (2018) y del esperado para 2025 con respecto a la nube metrológica de acceso diferenciado

Tema	N	Estado de desarrollo					
		Actual (2018)			Esperando a 2025		
		I	II	III	I	II	III
		Porcentaje de los encuestados					
Nube metrológica de acceso diferenciado para la gestión de la metrología legal (incluyendo regulaciones, aprobación de modelo, información de cada instrumento en uso y alarmas)	10	20%	60%	20%	0%	40%	60%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I: nada digitalizado o implementado; II: primeros desarrollos o procesos digitalizados o implementados; III: la mayoría o todos los procesos digitalizados o servicios implementados.

Asimismo, se preguntó a los INM sobre nubes metrológicas en general, es decir, no restringidas a la metrología legal.

Casi el 80% de los INM esperan para el año 2025 una demanda en su país para una nube metrológica nacional y regional SIM. Solo el 64% espera una demanda para una nube metrológica internacional BIPM. La demanda partirá principalmente de los INM mismos. Más del 60% espera contar para el año 2025 con primeros servicios de la nube metrológica implementados tanto de la nube nacional y regional, como internacional. Casi el 70% de los INM esperan una demanda en su país para arquitecturas de referencia y casi el 70% espera poder ofrecer en 2025 primeros servicios (cuadro 4).

Esta información se complementa con los resultados del taller Café Mundial realizado con el Consejo del SIM en marzo 2018 en Bogotá. La visión de la situación esperada en ALC para 2025 sobre este tema definida en el taller incluyó: la creación de una nube metrológica regional para datos importantes y la necesidad de contar con una nube metrológica regional integrada del SIM.

Como primeros pasos para avanzar hacia esa visión se nombró en el taller el mejoramiento de la información sobre el uso de nubes, por ejemplo, a través de la elaboración de material instructivo con buenos ejemplos.

Cuadro 4. Estimación de la demanda esperada, del interés y de las capacidades de los INM para 2025 con respecto a las nubes metrológicas de acceso diferenciado

Tema	Demanda esperada para el año 2025				Interés y capacidades de los INM en el año 2025			
	N	I	II	III	N	I	II	III
Nube metrológica nacional	14	21%	64%	14%	13	23%	54%	23%
Nube metrológica regional SIM	14	21%	79%	0%	13	31%	62%	8%
Nube metrológica internacional BIPM	14	36%	64%	0%	13	38%	62%	0%
Arquitectura de referencia para nubes metrológicas en el país	13	31%	69%	0%	12	33%	67%	0%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I = sin demanda o demanda incipiente; II = uno a varios sectores lo demandarán;

III = la mayoría de los sectores o toda la economía / sociedad lo demandará.

1: nada implementado; 2: primeros desarrollos o servicios/procesos implementados;

3: la mayoría o todos los procesos/servicios implementados.

2.1.4. Otros servicios y funciones de los INM

Además de desarrollar y custodiar los patrones nacionales, ofrecer la trazabilidad a los patrones a través de servicios de calibración y brindar servicios de verificación, los INM por lo general –aprovechando su mayor competencia técnica en temas de mediciones y metrología del país– proporcionan otros servicios metrológicos como información, difusión y sensibilización, capacitaciones y entrenamientos, asesorías y consultorías, e investigación, desarrollo e innovación.

La metrología solo funciona si lo hace como un sistema internacional. Por ello, los INM están insertos en el sistema internacional de metrología y en los subsistemas regionales como el SIM.

Las TI son instrumentos ideales para lograr:

- i. una masificación de los servicios;
- ii. una llegada más adecuada a los grupos meta;
- iii. una descentralización de las ofertas;
- iv. un mejor uso compartido de infraestructura, conocimiento e información a nivel nacional e internacional;
- v. una mejor forma de cooperación y de división del trabajo entre actores nacionales e internacionales;
- vi. una profesionalización a través de la estandarización de estos servicios.

Asimismo, los datos digitalizados históricos y actuales del laboratorio propio como de otros actores nacionales e internacionales, al igual que las nubes metrológicas y *big data* abren nuevas posibilidades para la investigación, desarrollo e innovación en temas vinculados con mejorar la incertidumbre de las mediciones, desarrollar nuevos métodos de medición y complejizar los

procesos de medición y las mediciones mismas. Expertos del NIST (2018) ven un gran potencial en aplicar IA para mejorar el procesamiento de los datos y así potenciar las experiencias de aprendizajes y desarrollos en los INM.

Estos desarrollos conllevarán a una democratización de los datos de medición, incluyendo la generación de datos. Esto solo funcionará si se asegura la autenticidad e integridad de los datos enviados, su seguridad, su protección frente a la manipulación y la confidencialidad.

La tecnología de cadena de bloques (*blockchain*) podría desempeñar un rol en el futuro para asegurar los datos. Según expertos del NIST (2018), esta tecnología todavía no se aplica en metrología. Los principios de *blockchain*, basados en un concepto de permisos descentralizados, y los de la metrología, basados en un concepto de permiso centralizado, son aparentemente contradictorios. A pesar de eso, los expertos del NIST no ven un conflicto sino más bien ven un potencial en la tecnología *blockchain* para asegurar confiablemente la información sobre la trazabilidad de las mediciones.

Los INM deben seguir desempeñando en el futuro el rol de referente y árbitro confiable y reconocido. Para mantener esa función en la era digital, los INM deben mantener la posición de albergar la mayor competencia técnica en temas de mediciones y metrología en el país. Esto solo podrán mantenerlo en el futuro si desarrollan capacidades, al menos, de metrología 3.0 sino de metrología 4.0.

La situación en ALC

El tercer aspecto consultado en la encuesta fue el estado actual de desarrollo (2018) y el estado de desarrollo esperado a 2025 con respecto a otros servicios y funciones de los INM. En este sentido, se realizaron preguntas en los siguientes cuatro temas:

- i. difusión y sensibilización con instrumentos de TI;
- ii. capacitación con instrumentos de TI;
- iii. asesoría a la industria con instrumentos de TI;
- iv. desarrollo de modelos y simulaciones metrológicas con base en datos generados en los laboratorios de los INM.

El nivel actual de uso de los instrumentos de TI para la difusión, capacitación y asesoría de la industria es intermedio (cuadro 5). La mayoría declaró tener primeros desarrollos y una quinta parte afirmó tener la mayoría de los servicios de difusión y capacitación implementados con aplicación de instrumentos de TI. Con respecto a los servicios de difusión y capacitación, alrededor de cuatro quintos esperan poder ofrecerlos en 2025 mayormente o totalmente con apoyo de instrumentos de TI. En cuanto al asesoramiento a la industria, el nivel de desarrollo esperado es menor.

El salto en el grado de implementación esperado entre 2018 y 2025 para el desarrollo de modelos y simulaciones metrológicas y para la participación en nubes metrológicas regionales e internacionales es relativamente grande. En la actualidad más de dos tercios declaran no tener nada implementado pero para el año 2025 la mayoría espera tener varios modelos y simulaciones metrológicas desarrollados y participar activamente en las nubes metrológicas regionales e internacionales.

Cuadro 5. Autoevaluación del estado actual de desarrollo (2018) y del estado de desarrollo esperado para 2025 con respecto a otros servicios y funciones de los INM

Tema	N	Estado de desarrollo					
		Actual (2018)			Esperando a 2025		
		I	II	III	I	II	III
Porcentaje de los encuestados							
Difusión y sensibilización con instrumentos de TI	15	13%	67%	20%	0%	13%	87%
Capacitación con instrumentos de TI	15	27%	53%	20%	0%	20%	80%
Asesoría a la industria con instrumentos de TI	15	47%	47%	7%	0%	60%	40%
Desarrollo de modelos y simulaciones metrológicas con base en datos generados en los laboratorios de los INM	15	73%	20%	7%	13%	33%	53%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I: nada digitalizado o implementado; II: primeros desarrollos o procesos digitalizados o implementados; III: la mayoría o todos los procesos digitalizados o servicios implementados.

2.2. Metrología para asegurar las bases de la transformación digital

La metrología para asegurar las bases de la transformación digital existe a nivel mundial en parte. Pero hay una gran necesidad para desarrollar conceptos, nuevos métodos de medición y competencia técnica para que la metrología pueda realmente ser vista como una base de la transformación digital. Para los INM más avanzados esto es un desafío real, que ellos han empezado a afrontar. Por eso, varios de los temas que se tratan en esta publicación deberán abordarlos los INM de ALC no tan desarrollados como un segundo o tercer paso del proceso de fortalecimiento y desarrollo de la metrología para la transformación digital de la economía y la sociedad. Esto no significa que los INM no estarán pronto confrontados con una demanda de servicios metrológicos 3.0 o 4.0 en sus países, lo cuales actualmente no pueden ofrecer. Por ello, la identificación de los saltos tecnológicos será crucial para que la brecha de desarrollo entre los INM no crezca.

En los apartados que siguen se analizan los siguientes temas como base para la transformación digital: metrología para asegurar las bases tecnológicas de la comunicación; instrumentos y sistemas de medición en la era digital; metrología y *big data*; mediciones virtuales y simulaciones; y desarrollo de conceptos metrológicos, incluido la ciberseguridad.

2.2.1. Metrología para asegurar las bases tecnológicas de la comunicación

La transformación digital de la economía y la sociedad requiere de una base tecnológica de la comunicación que facilite la transmisión de grandes paquetes de información entre múltiples usuarios, de forma simultánea y a través de redes alámbricas e inalámbricas. 5G es el estándar

de la comunicación de la siguiente generación. En el estudio del PTB (2017a) se cita el *5G White Paper* (2015) de la Alianza de Redes Móviles de Próxima Generación (NGMN, por sus siglas en inglés), en donde:

[se] definen los requisitos para un estándar 5G como sigue: disponibilidad de muy altas velocidades de transmisión de datos (100 Mbit/s a 1Gbit/s) para grandes grupos de usuarios simultáneamente, varios cientos de miles de conexiones inalámbricas simultáneas, un uso mucho más eficiente del rango espectral comparado con 4G, una latencia significativamente menor en comparación con LTE y una mayor eficiencia de transmisión. [...] En la comunicación 5G y en la modulación digital, las magnitudes de medida de alta frecuencia son generalmente muy complejas, no lineales, estocásticas y altamente dimensionales. (PTB, 2017a)

La metrología que soportará esta tecnología todavía está en desarrollo. En Alemania existe trazabilidad “casi exclusivamente para las magnitudes básicas (señales de ondas continuas no moduladas, caracterización lineal)” (PTB, 2017a). Por su parte, también

el aseguramiento de la fiabilidad [...] [de las matrices de antena con tecnología de entrada múltiple y salida múltiple (MIMO, por sus siglas en inglés)] requiere la caracterización metrológica de la tecnología de transmisión y recepción utilizada, así como la calibración trazable de los dispositivos de medición utilizados para la caracterización (PTB, 2017a).

La situación en ALC

En la segunda parte de la encuesta se les pidió que estimaran la demanda esperada en 2025, así como el interés y las capacidades de los INM en ese año con respecto al aseguramiento de las bases tecnológicas, específicamente en relación con los siguientes temas:

- i. servicios de calibración para asegurar la trazabilidad para la tecnología 5G;
- ii. servicios de calibración para asegurar la trazabilidad para la caracterización de antenas con tecnología MIMO.

El 85% de los encuestados sostuvo que para el año 2025 espera que uno a varios sectores de su país demanden servicios de calibración para asegurar la trazabilidad en la comunicación 5G y para la caracterización de las antenas con tecnología MIMO. Pero más de un tercio no espera tener nada implementado para ese año y solo la mitad espera tener primeros servicios implementados. Como desafíos se observa que los INM no tienen actualmente capacidades instaladas o las tienen solo básicas en las magnitudes correspondientes, por lo que el salto tecnológico requerido necesitaría de inversiones considerables en laboratorios, equipamiento y personal calificado (cuadro 6).

Cuadro 6. Estimación de la demanda esperada, el interés y las capacidades de los INM para 2025 con respecto al aseguramiento de las bases tecnológicas.

Tema	Demanda esperada para el año 2025				Interés y capacidades de los INM en el año 2025			
	N	I	II	III	N	I	II	III
Servicios de calibración para asegurar la trazabilidad para la tecnología 5G	13	8%	85%	8%	14	36%	50%	14%
Servicios de calibración para asegurar la trazabilidad para la caracterización de antenas con tecnología MIMO	13	15%	85%	0%	14	43%	50%	7%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I = sin demanda o demanda incipiente; II = uno a varios sectores lo demandarán; III = la mayoría de los sectores o toda la economía / sociedad lo demandará.

1: nada implementado; 2: primeros desarrollos o procesos/servicios implementados; 3: la mayoría o todos los procesos/servicios implementados.

2.2.2. Instrumentos y sistemas de medición en la era digital

Si bien actualmente también se ofrecen calibraciones in situ, la mayoría de las calibraciones de los instrumentos de medición de la industria se realizan en un laboratorio interno o externo bajo condiciones de medición controladas.

Las necesidades y los potenciales de la industria 4.0 junto con la accesibilidad a instrumentos de medición y sensores digitales de bajo costo elevarán el número de instrumentos y sistemas de medición utilizados e incorporados en los sistemas de producción. El desafío para el futuro es por lo tanto asegurar la trazabilidad de los instrumentos o sistemas de medición incorporados en los procesos de producción de forma confiable, con la incertidumbre necesaria, parcialmente de forma remota y al menor costo posible para la empresa.

Asimismo, es de esperar que cada vez más sistemas de medición autónomos, de mediciones complejas, móviles, descentralizados y/o inteligentes serán requeridos y utilizados en la industria, la economía y la sociedad en general. Se contará con redes de sensores, por lo que se deberá asegurar la interpretación y gestión metrológica de los datos proporcionados por las mismas. Según expertos del NIST (2018), en el futuro se tendrán que desarrollar estándares para sensores inteligentes. Ya existe por ejemplo la norma ISO/IEC/IEEE 21451-7:2011 para estandarizar la comunicación entre sensores.⁸

Es posible imaginar que con apoyo de modelos matemáticos y/o *big data*, basados en los resultados de mediciones hechas bajo condiciones controladas o monitoreadas por redes de sensores, se valide constantemente de forma remota y/o automatizada que la deriva de los

⁸ Para más información, véase ISO/IEC/IEEE 21451-7:2011: Information technology – Smart transducer interface for sensors and actuators. Parte 7: Transducer to radio frequency identification (RFID) systems communication protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats.

instrumentos de medición no sobrepase los límites tolerados. Con ello se podrían extender los periodos necesarios de calibración o verificación de los instrumentos de medición.

Los instrumentos de medición serán cada vez más complejos. Instrumentos con componente digital y con preprocesamiento de datos como los medidores inteligentes ya son bastante comunes en algunos sectores. Sistemas de medición que analicen e interpreten los datos en una nube metrológica no serán una excepción en un futuro cercano.

Por su parte, la necesidad de identificar rápida y certeramente los instrumentos de medición a través de códigos de identificación digital único se verá incrementada en el futuro. Esto permitirá mejorar la eficiencia y eficacia de los procesos de control.

La situación en ALC

En la encuesta se solicitó que estimaran la demanda esperada en 2025 y el interés y las capacidades de los INM en ese año con respecto a los instrumentos y sistemas de medición en la era digital.

Más del 70% de los INM de ALC espera que para 2025 haya en su país demanda para servicios de calibración, verificación y/o validación de sensores incorporados en máquinas, de redes de sensores, de sistemas de medición integrados en proceso productivos, de forma remota, completamente automatizada y de instrumentos de medición con interpretación de datos virtuales. Pero alrededor del 50% piensa que su INM no tendrá nada implementado como para atender esta demanda (cuadro 7).

Cuadro 7. Estimación de la demanda esperada, el interés y las capacidades de los INM en 2025 con respecto a los instrumentos y sistemas de medición en la era digital

Tema	Demanda esperada para el año 2025				Interés y capacidades de los INM en el año 2025			
	N	I	II	III	N	I	II	III
Servicios de calibración, verificación y validación de sensores incorporados en máquinas	15	13%	73%	13%	15	53%	27%	20%
Servicios de calibración, verificación y validación de redes de sensores	15	13%	80%	7%	15	53%	27%	20%
Servicios de calibración, verificación y validación remota	15	20%	73%	7%	15	53%	27%	20%
Servicios de calibración, verificación y validación completamente automatizada	15	27%	53%	20%	14	57%	21%	21%
Servicios de calibración, verificación y validación de sistemas de medición integrados en procesos productivos	15	27%	53%	20%	15	47%	33%	20%

Servicios de calibración, verificación y validación de instrumentos de medición con sensores reales e interpretación de datos virtual (por ejemplo, en la nube metrológica)	15	27%	60%	13%	15	47%	40%	13%
Código de identificación digital único (por ejemplo, QR) para los instrumentos de medición utilizados en el ámbito regulado	15	0%	60%	40%	15	47%	20%	33%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I = sin demanda o demanda incipiente; II = uno a varios sectores lo demandarán; III = la mayoría de los sectores o toda la economía / sociedad lo demandará.

1: nada implementado; 2: primeros desarrollos o procesos/servicios implementados; 3: la mayoría o todos los procesos/servicios implementados.

El 100% de los encuestados piensa que en 2025 habrá demanda para códigos de identificación digital único, pero casi el 50% no espera tener nada implementado en su INM para atender esta demanda.

Esta información se complementa con los resultados del taller Café Mundial realizado con el Consejo del SIM en marzo 2018 en Bogotá. La visión de la situación esperada en ALC para 2025 sobre este tema definida en el taller incluyó la capacidad de los INM de realizar calibraciones de forma remota priorizando las magnitudes de mayor demanda y con mayor avance digital como energía, longitud y masa.

Como primeros pasos para avanzar hacia esa visión se nombraron en el taller la democratización del acceso a Internet, el desarrollo de políticas que fomenten la interacción digital y la generación de espacios de sensibilización hacia las nuevas tecnologías.

Para desarrollar las capacidades, los INM requieren entender la dinámica de la demanda para estos servicios, la necesidad de personal calificado, *software*, etc. Asimismo, probablemente se requiere de una modernización de los reglamentos técnicos que regulan la verificación de los instrumentos.

2.2.3. Metrología y *big data*

En *big data* se manejan grandes volúmenes de datos y estos pueden ser el resultado de mediciones. *Big data* puede ser utilizado para mejorar el desempeño de las máquinas (*machine learning*), pero también los instrumentos y sistemas de medición pueden aprender con base en *big data*.

No solo es necesario que las mediciones hayan sido realizadas de forma trazable y con una estimación de la incertidumbre, sino que estos datos hayan alimentado *big data* utilizando códigos armonizados. Solo así se podrá garantizar que los datos en *big data* sean comparables y confiables. Además, hay que prever la seguridad de los datos tanto en el momento de su generación como en el de su transmisión.

La estructura de datos en *big data* puede ser compleja, de alta dimensionalidad, variabilidad, volatilidad y de diferentes calidades. Adicionalmente, la cantidad de datos que se genera por cada medición se está incrementando. Por ello, la pregunta acerca de cómo reducir la cantidad de datos de una medición a ser transmitida sin aumentar su incertidumbre es crucial para incrementar la eficiencia en *big data*.

Expertos del NIST (2018) han investigado la aplicación de *big data* en metrología. Según sus conclusiones, la utilidad dependerá de la exactitud de las mediciones, de la buena definición de los procesos para la incorporación de los datos y de la capacidad de asegurar la confianza en los datos. También observaron que la incorporación de datos con sesgo resultaba en una deriva del conjunto de los datos. Por ello, el monitoreo en la incorporación de los datos en *big data* será un desafío, ya que se debe evitar la inclusión de datos con sesgo, independientemente de si este se hizo sin intención o de forma deliberada.

La situación en ALC

En la encuesta se solicitó que estimaran la demanda esperada en 2025 y el interés y las capacidades de los INM para ese año con respecto a metrología y *big data*.

Más del 70% de los INM encuestados esperan para el año 2025 una demanda en su país para normas de lenguaje y códigos metrológicos, así como servicios metrológicos para *big data*. Y más de la mitad espera tener por lo menos primeras normas y códigos, y, al menos, primeros servicios implementados (cuadro 8).

Cuadro 8. Estimación de la demanda esperada, el interés y las capacidades de los INM para 2025 con respecto a metrología y *big data*

Tema	Demanda esperada para el año 2025				Interés y capacidades de los INM en el año 2025			
	N	I	II	III	N	I	II	III
Normas de lenguaje y códigos metrológicos para <i>big data</i>	15	27%	60%	13%	15	47%	40%	13%
Servicios metrológicos para el aseguramiento de la trazabilidad y confiabilidad de las mediciones que generan datos para <i>big data</i>	15	20%	73%	7%	15	47%	40%	13%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I = sin demanda o demanda incipiente; II = uno a varios sectores lo demandarán; III = la mayoría de los sectores o toda la economía / sociedad lo demandará.

1: nada implementado; 2: primeros desarrollos o procesos/servicios implementados; 3: la mayoría o todos los procesos/servicios implementados.

Esta información se complementa con los resultados del taller Café Mundial realizado con el Consejo del SIM en marzo 2018 en Bogotá. La visión de la situación esperada en ALC para 2025 sobre este tema definida en el taller incluyó: los INM tienen la capacidad para brindar confianza para el manejo de la información metrológica en *big data* y se usan los sets de datos de forma holística, agregando datos de varios instrumentos y no como experimentos individuales. Como primeros pasos para avanzar hacia esa visión se mencionaron la sensibilización y capacitación en el tema, y la identificación y colección de los sets de datos para su análisis, entre los que se consideran de interés, por ejemplo, los resultados de intercomparaciones (mediciones diferentes y diversas a un instrumento bajo condiciones controladas).

2.2.4. Mediciones virtuales y simulaciones

La industria ha reconocido que la metrología es una herramienta efectiva no solo para mejorar la eficiencia de los procesos productivos y asegurar la calidad de los productos, sino también para poder aplicar de manera controlada nuevas tecnologías en los procesos productivos.

En la industria automotriz, por ejemplo, en las mediciones con máquinas por coordenadas no se lograba determinar la incertidumbre de las mediciones utilizando los métodos de cálculo convencionales a un costo razonable.

Esto se debía a que la cantidad y complejidad de los factores que influyen en este tipo de mediciones no lo permitía. Pero en el año 2004 se terminó de desarrollar una máquina de medición por coordenadas virtual. Esta máquina virtual ejecuta una simulación para determinar la incertidumbre de las mediciones realizadas en la máquina real. La máquina virtual se basa en los datos de 10.000 mediciones hechas en el marco de un proyecto de investigación de dos años de duración entre el PTB y ocho socios de la industria (Wäldele et al., 2004).

Asimismo, el PTB ha desarrollado el primer gemelo digital de una pesa con el que se puede mejorar la determinación de la incertidumbre de la medición. Para ello se combina la función del modelo con una simulación de Monte-Carlo. De la distribución de los parámetros de medición y de las condiciones de la medición se calcula la distribución de los valores de la medición y sobre esa base se determina la incertidumbre de la medición. Adicionalmente a esta determinación, se puede pronosticar la incertidumbre bajo condiciones de medición diferentes (PTB, 2017b).

Según el Director General del NRC de Canadá, Alan Steel, los modelos y las simulaciones matemáticas ya se aplican parcialmente en mediciones y calibraciones complejas. Esta experiencia es transferible a modelos y simulaciones de mediciones en condiciones de laboratorio que no cumplen con las especificaciones acordadas por la comunidad metrológica como requisito para realizar mediciones reconocidas y determinar la incertidumbre correspondiente. Estos modelos permitirían realizar las correcciones correspondientes y reducir la incertidumbre de la medición.

Un riesgo que ve Alan Steel en el uso de instrumentos digitales, y más aún en las mediciones virtuales, es que los instrumentos y estos sistemas siempre van a arrojar un resultado que se lee en la pantalla. Pero el sentido de la medición y la correcta interpretación de los valores obtenidos solo puede hacerlos realmente un metrólogo que entiende el trasfondo de la medición. En la actualidad, por ejemplo, no es una excepción que para la calibración de termómetros de

contacto se realice solo la calibración de la parte digital mediante la generación de un impulso eléctrico. En esos casos se está obviando la reacción del sensor ante los cambios de temperatura y los impulsos correspondientes que genera. Los problemas conceptuales metrologógicos y el impacto de ellos se verán multiplicados en las mediciones virtuales.

La situación en ALC

En la encuesta se solicitó que estimaran la demanda esperada en 2025 y el interés y las capacidades de los INM para ese año con respecto a modelos matemáticos y simulaciones que permitan:

- i. reducir la incertidumbre de las mediciones;
- ii. extender los periodos de calibración/verificación;
- iii. determinar la incertidumbre de mediciones complejas;
- iv. realizar mediciones virtuales;
- v. analizar la sensibilidad de los factores que influyen en las mediciones.

Más del 70% de los INM esperan para el año 2025 una demanda de modelos matemáticos o simulaciones que permitan reducir la incertidumbre o extender los periodos de calibración o verificación de los instrumentos de medición. También más del 70% espera tener al menos primeros modelos matemáticos o simulaciones implementados para ello en 2025.

Asimismo, alrededor del 60% de los INM esperan una demanda para modelos matemáticos o simulaciones que permitan determinar la incertidumbre de mediciones complejas o virtuales. Más del 70% espera tener al menos primeros modelos matemáticos o simulaciones implementados para determinar la incertidumbre de mediciones complejas y el 40% no espera tener algo implementado para mediciones virtuales hasta el año 2025 (cuadro 9).

El desafío se centra en tener la capacidad matemática y de desarrollo de simulaciones en los INM, y en generar los datos necesarios y confiables para los modelos y las simulaciones.

Esta información se complementa con los resultados del taller Café Mundial realizado con el Consejo del SIM en marzo 2018 en Bogotá. La visión de la situación esperada en ALC para 2025 sobre este tema definida en el taller incluyó el mejoramiento de la incertidumbre de las mediciones usando modelos y simulaciones de los procesos e instrumentos de medición.

Como primeros pasos para avanzar hacia esa visión se mencionaron la identificación de las personas que ya trabajan en simulaciones, instrumentos virtuales y modelación, y el establecimiento de una red con estos expertos.

Cuadro 9. Estimación de la demanda esperada, el interés y las capacidades de los INM para 2025 con respecto a mediciones virtuales y simulaciones

Tema	Demanda esperada para el año 2025				Interés y capacidades de los INM en el año 2025			
	N	I	II	III	N	I	II	III
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan reducir la incertidumbre de las mediciones	15	27%	73%	0%	15	27%	60%	13%
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan extender los periodos de calibración/verificación	15	27%	67%	7%	15	27%	60%	13%
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan determinar la incertidumbre de mediciones complejas	14	43%	50%	7%	15	27%	60%	13%
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan que permitan mediciones virtuales	14	36%	64%	0%	14	43%	36%	21%
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan el análisis de sensibilidad de los factores que influyen en las mediciones	15	40%	53%	7%	15	33%	47%	20%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I = sin demanda o demanda incipiente; II = uno a varios sectores lo demandarán; III = la mayoría de los sectores o toda la economía / sociedad lo demandará.

1: nada implementado; 2: primeros desarrollos o servicios/procesos implementados; 3: la mayoría o todos los procesos/servicios implementados.

2.2.5. Desarrollo de conceptos metrológicos

El tema de la transformación digital y la metrología 4.0 es nuevo no solo en ALC sino en todo el mundo. El PTB elaboró el estudio *Metrología para la digitalización de la economía y la sociedad* a fin de prepararse para los desafíos que resultan de la iniciativa industria 4.0 y de la transformación digital en que se encuentra Alemania.

Es conocido que cada calibración de un instrumento incrementa la información y el conocimiento sobre el comportamiento del instrumento en cuestión, así como el comportamiento de ese tipo de instrumentos y sobre las mediciones en la magnitud respectiva. La información de cada medición está almacenada en diversas libretas, cuadernos, computadoras y memorias digitales de los diferentes INM. Esta información es parte del petróleo del siglo XXI y es una gran oportunidad para la metrología y los INM.

Si se hace accesible y comparable a través de *big data* o en una nube metrológica se pueden sacar conclusiones muy valiosas para la industria. Se puede pasar de un mantenimiento preventivo (por ejemplo, calibrar cada año) a uno predictivo de los ciclos de calibración (por

ejemplo, calibrar cuando por el tipo de instrumento y por su comportamiento se reconoce que debe ser calibrado). Se puede reducir la incertidumbre de las mediciones a través de mejores datos, datos interconectados y un mejor manejo de las variables que contribuyen a la incertidumbre.

Con el uso de sensores se puede lograr un mantenimiento predictivo de las máquinas en los procesos productivos, el cual reduce los costos de mantenimiento de las máquinas frente al mantenimiento preventivo. Según expertos del NIST (2018), el mayor beneficio actual del IoT son las mejoras y reducción de costos a través del monitoreo del desempeño de las máquinas (*machine health monitoring*).

Con respecto al certificado de calibración digital, hay dos ideas al respecto. Uno es que el certificado sea emitido tal cual su análogo, pero en un documento digital como por ejemplo un archivo pdf. Este certificado con la firma digital correspondiente puede ser enviado al cliente vía Internet y este lo podrá hacer parte de su sistema de calidad como documento digital. La otra es que el certificado se base en el formato de intercambio XML (*extensible markup language*) y pueda ser legible de forma directa por las máquinas. Más allá de asegurar la trazabilidad, estos certificados incluyen datos de curvas de calibración numéricas que pueden utilizarse en todos los procesos con soporte digital (PTB, 2017c).

Los INM desempeñan un rol en la ciberseguridad ya que tienen que garantizar que los datos que producen como referencia y que aseguran la trazabilidad lleguen y sean utilizados por la industria, el comercio y otros usuarios de manera confiable.

El Presidente del SIM, Héctor Laiz, diferencia los siguientes aspectos: la inmunidad de los sistemas frente al fraude y frente a ataques de piratas informáticos, la confiabilidad de los datos y la confidencialidad de los mismos (Laiz, 2018).

Las necesidades de la industria 4.0 y de otros sectores requieren de nuevos conceptos metrologógicos para lograr las calibraciones en línea, asegurar la trazabilidad de redes de sensores, calibrar robots y utilizarlos en los trabajos de los INM, realizar impresiones y escaneos en tres dimensiones.

El rol de los INM en un mundo 4.0 con IA se puede prever por ejemplo sobre la base de una noticia aparecida en la revista Der Spiegel de Alemania. La autoridad antimonopolio alemana identificó como un riesgo el acuerdo de precios entre los algoritmos que definen los precios en la venta de productos en línea (Der Spiegel, 2018). Así como la autoridad antimonopolio tiene que seguir cumpliendo su rol en la era digital, los INM deben ser los referentes y custodios de las mediciones confiables en las redes. Para ello, también deben desarrollar y adaptar los conceptos metrologógicos.

La situación en ALC

En la encuesta se pidió que estimaran la demanda esperada en 2025 y el interés y las capacidades de los INM en ese año con respecto al desarrollo de conceptos metrologógicos.

Más del 90% espera que en 2025 al menos un sector demande que los INM funcionen como referente nacional para temas de metrología y transformación digital, pero más del 43% de los INM no espera haber implementado algo hasta ese año en ese aspecto.

Todos los INM esperan que en el año 2025 haya al menos un sector que demande servicios de asesoría técnica en estos temas y más del 75% confía haber implementado al menos primeros servicios de asesoría en estos temas para 2025.

Todos los INM esperan que en 2025 haya al menos un sector que demande certificados de calibración o de verificación digitales. Y más del 75% espera haber implementado al menos primeros certificados digitales para ese año (cuadro 10). Es de suponer que los INM estaban evaluando el tipo de certificado digital que corresponde a un certificado con firma digital, pero que no es legible directamente para las máquinas.

Esta información se complementa con los resultados del taller Café Mundial realizado con el Consejo del SIM en marzo 2018 en Bogotá. La visión de la situación esperada en ALC para 2025 sobre este tema definida en el taller incluyó una plataforma única con todos los conceptos metrológicos de fácil acceso para todos los actores.

Como primeros pasos para avanzar hacia esa visión se mencionaron en el taller: la conformación de un grupo de trabajo técnico para discutir los conceptos en el SIM, la armonización de los conceptos y el entendimiento del concepto industria 4.0, y el desarrollo de una aplicación para facilitar la difusión de los conceptos.

Cuadro 10. Estimación de la demanda esperada, el interés y las capacidades de los INM para 2025 con respecto al desarrollo de conceptos metrológicos

Tema	Demanda esperada para el año 2025				Interés y capacidades de los INM en el año 2025			
	N	I	II	III	N	I	II	III
Función de los INM como referente nacional para temas de metrología y transformación digital	14	7%	86%	7%	14	43%	29%	29%
Servicios de asesoría técnica para apoyar la transformación digital por magnitud en la industria y otros sectores	14	0%	93%	7%	13	23%	54%	23%
Certificados de calibración y verificación digital	15	0%	67%	33%	14	14%	43%	43%
Certificados digitales con coeficientes de sensibilidad de parámetros de medición incluidos	14	14%	79%	7%	13	31%	38%	31%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: I = sin demanda o demanda incipiente; II = uno a varios sectores lo demandarán; III = la mayoría de los sectores o toda la economía / sociedad lo demandará.

1: nada implementado; 2: primeros desarrollos o servicios/procesos implementados; 3: la mayoría o todos los procesos/servicios implementados.

3. Desafíos y propuestas de desarrollo para los institutos nacionales de metrología en América Latina y el Caribe

Las propuestas de desarrollo hacia una metrología y un INM que ofrezca soluciones y servicios para la transformación digital de la economía y sociedad se basan, por un lado, en las necesidades actuales y del futuro en esta materia y, por el otro, en las capacidades existentes y en los desafíos actuales y futuros de los INM de ALC para poder desarrollar sus competencias técnicas.

3.1. Propuestas generales

La transformación digital de las economías y sociedades es un proceso emergente, no solo en ALC sino en el mundo. Es un tema que se encuentra en una gran dinámica por lo que el conocimiento asegurado es muy limitado. Y las experiencias también lo son.

La participación en el taller de intercambio y análisis con el Consejo del SIM y el BID en Bogotá (en marzo de 2018), así como el alto número de respuestas a la encuesta (15 de los 17 INM encuestados), demuestra que los INM de ALC consideran importante el tema en la actualidad y para el futuro, y creen que deben darle respuesta. Sin embargo, en las encuestas sobre los conceptos metrológicos para asegurar las bases de la transformación digital, más del 90% de los INM declararon no tener o tener solo conocimiento básico sobre algunos temas (véanse los cuadros en el Anexo).

En el cuadro 11 se observa que los institutos están interesados en recibir apoyo de la cooperación técnica para desarrollar a corto plazo diferentes capacidades metrológicas para la transformación digital. El de mayor mención ha sido el de *big data*, pero también hay que considerar que aquí más del 90% de los INM declararon no tener o tener solo conocimiento básico sobre este tema (véase el Anexo). Si bien solo cerca del 40% de los INM entrevistados han mencionado los eventos de información y sensibilización sobre metrología y transformación digital como actividades de mayor interés para ser implementadas a corto plazo, se identifica como necesario e importante elevar el nivel de conocimiento en los INM sobre los temas y los potenciales de la transformación digital.

Cuadro 11. Temas de mayor interés mencionados por los INM para ser propuestos a la cooperación técnica en los años 2018 y 2019

Tema	Porcentaje de INM (N=13)
Fortalecer la competencia técnica para responder a los requerimientos de big data	20%
Fortalecer la competencia técnica para la digitalización de los servicios de calibración y verificación	20%
Fortalecer la competencia técnica para responder a los requerimientos de los instrumentos y sistemas de medición en la era digital	20%
Fortalecer la competencia técnica para el uso y desarrollo de la nube metrológica	21%
Fortalecer la competencia técnica para desarrollar metrología que soporte la tecnología 5G y antenas con tecnología MIMO	20%
Realizar eventos de información y sensibilización sobre metrología y transformación digital	13%
Fortalecer la competencia técnica para el uso de TI para las otras funciones de los INM (difusión, capacitación, asesoría, etc.)	33%
Fortalecer la competencia técnica para desarrollar modelos y simulaciones	21%
Fortalecer la competencia técnica para ofrecer certificados digitales	20%
Adquirir equipamiento para la digitalización	13%
Recibir capacitación sobre la normativa aplicable	33%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: Los entrevistados podían mencionar hasta cinco ideas, todas las cuales fueron de formulación libre. Los autores agruparon las menciones según los temas expuestos en esta lista. Se muestra el porcentaje de los INM que mencionaron al menos un tema de esta lista.

Asimismo, se podría afirmar que el tema metrología y transformación digital puede implicar el enfrentamiento de conceptos diferentes. Por un lado, se encuentra la metrología que se basa en cimientos construidos durante décadas que aseguran la trazabilidad y la comparabilidad de las mediciones en todo el mundo, con procedimientos que evalúan de manera rigurosa la competencia técnica de los laboratorios que participan en la construcción de las bases para la trazabilidad y comparabilidad. Por otro lado, está, por ejemplo, *big data* que se puede asociar con el principio de la inteligencia colectiva basado en un gran número de contribuyentes de datos y de decisiones automatizadas. La evaluación rigurosa de la competencia técnica de los laboratorios que contribuyen a *big data* sería un gran desafío. Por ello, si se pusiera como condición que solo los que cumplen con los requisitos y son evaluados pueden contribuir

significativamente al sistema, se trataría de microdatos (*small data*). En cambio, si se aceptaran todos los laboratorios indiferentemente de su competencia se lograría un *big data* pero de trazabilidad cuestionable.

1. *Es necesario realizar actividades de información y sensibilización en todos los niveles de los INM, tanto de los potenciales que la transformación digital tiene para la metrología, como sobre las necesidades metrológicas que se deben resolver para que la transformación digital se dé en forma efectiva y eficiente. Esto debe hacerse de forma general y también de forma específica para las necesidades de la industria 4.0 y de los sectores transporte, salud, energía (renovables), medio ambiente, etcétera.*
2. *Asimismo, es necesario realizar actividades de intercambio entre los dos mundos, la metrología y la transformación digital, tratando de que con el tiempo no sean vistos como mundos diferentes, sino como complementarios y que se necesitan el uno al otro.*

El desafío común es la falta de personal capacitado y calificado para lograr los desarrollos que se necesitan. Se podría afirmar que en los INM debe existir al menos un núcleo importante de profesionales que manejen tanto los temas metrológicos como los temas y los instrumentos de la transformación digital. Si bien en el futuro podrán encontrarse expertos de la transformación digital fácilmente fuera de los INM, será difícil encontrar expertos de la transformación digital con conocimiento especializado y experiencia metrológica fuera de los INM.

Cuadro 12. Personal de los INM y personal especializado en digitalización en 2018 y pronosticado para 2025

Tema	N	Promedio		
		2018	2025	Incremento
Personal total de los INM	12	76,5	142,4	+86%
Personal de los INM especialista en programación, estadística, modelación, y/o simulación	12	8,2	25,5	+212%

Fuente: Elaboración propia.

El número de colaboradores de los INM en ALC es diverso, ya que se encuentran INM con siete colaboradores e INM con hasta 400 colaboradores, aunque el promedio de los encuestados es de 77 colaboradores. El número de colaboradores especialistas en programación, estadística, matemática, modelación y/o simulación se encuentra en el rango de entre 0 y 40, con un promedio de 8 (cuadro 12).

Es interesante constatar que los encuestados esperan un crecimiento sobreproporcional para este grupo de especialistas en comparación con el crecimiento esperado para el número total de colaboradores de los INM en 2025. Si se considera que los INM no son las únicas organizaciones que están demandando este tipo de perfil profesional, el desafío de atraerlos a los INM es mucho mayor.

1. *Es necesario iniciar con actividades de capacitación en los INM para fortalecer la competencia técnica en los siguientes temas: digitalización de los servicios de calibración y verificación, desarrollo y uso de la nube metrológica y TI para las otras funciones de los INM (véase el apartado 4.2.).*
2. *Se debe promover que en las carreras y en la formación de profesionales para la transformación digital también la metrología sea uno de los temas de la formación.*
3. *Se recomienda aprovechar las experiencias y competencias técnicas que existen en la región en estos temas y crear los espacios de intercambio y de transferencia de experiencia y conocimiento correspondientes.*

Con respecto al nivel de infraestructura y equipamiento, casi el 80% de los INM han declarado tener un nivel de infraestructura TI y equipos TI regular. Asimismo, casi el 60% espera tener infraestructura de avanzada en el año 2025 y casi el 50% espera tener equipos TI de avanzada en el mismo año.

Cuadro 13. Nivel de infraestructura y equipamiento TI en 2018 y pronosticado para 2025

Tema	Nivel de infraestructura y equipamiento TI									
	2018					2025				
	N	I	II	III	IV	N	I	II	III	IV
Infraestructura TI (por ejemplo: servidor, cableado, antenas)	14	14%	7%	79%	0%	14	0%	14%	29%	57%
Equipos TI (por ejemplo: computadoras, laptops, sensores digitales, etc.)	14	0%	21%	79%	0%	13	0%	0%	54%	46%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: 1: insuficiente; 2: básico; 3: regular; 4: de avanzada.

No obstante esta visión optimista, la falta de recursos financieros, infraestructura y equipamiento adecuado, la reducida banda ancha de Internet y hasta los cortes de luz han sido mencionados como desafíos importantes para lograr el avance tecnológico en el área de TI.

Algunos INM están en etapa de construcción o planean la construcción de un nuevo edificio y sería importante que estén conscientes de las necesidades que deben considerar sobre las TI del futuro.

1. *Es necesario desarrollar conocimiento sobre las necesidades actuales y futuras de infraestructura y equipamiento TI para que sea considerado en las compras de equipamiento TI, así como en la planificación de la construcción de nuevos laboratorios.*
2. *Es necesario identificar fuentes de financiamiento para asegurar una mejor infraestructura y equipamiento de los INM con TI.*

Otro desafío mencionado es la falta o el alto costo del *software* necesario para desarrollar las capacidades y servicios requeridos.

Una pregunta importante es si el *software* es desarrollado en casa o comprado externamente. En este sentido, un potencial para reducir los costos y tiempos de desarrollo es la cooperación entre los INM. Las necesidades son bastante parecidas y hay que evitar que cada instituto reinvente la rueda.

Con respecto a un sistema único de datos e información en los INM, casi todos los INM están iniciando de cero o lo tienen poco desarrollado. Es una situación ideal para que desde un inicio se eviten crear barreras futuras a la cooperación y uso conjunto de los datos e instrumentos virtuales. Es decir: la estandarización y el desarrollo de códigos armonizados a nivel regional e internacional son elementos cruciales en estos procesos.

Asimismo, la gestión de la ciberseguridad es un desafío que desde un inicio debe ser considerado no solo para cumplir con la legislación sobre la protección de datos, sino para garantizar su manejo seguro y con ello lograr la aceptación en el mercado de los nuevos servicios que se prestan y de la nueva forma de prestar los servicios.

1. *El aprovechamiento de la cooperación entre los INM puede ayudar a reducir costos y tiempos de desarrollo de software y a generar los conceptos y estructuras que apoyan la ciberseguridad.*
2. *Se debe intentar establecer un banco de datos e información único en los INM.*
3. *Se deben buscar y desarrollar los espacios para lograr desde el inicio la estandarización y armonización necesarias para compartir en el futuro las estructuras, datos, experiencias, etc., considerando la ciberseguridad.*

3.2. Propuestas específicas

Las propuestas específicas se basan en la premisa de que los INM que respondieron las preguntas con respecto a la cooperación técnica (N=14) han declarado estar dispuestos a participar activamente en ese tipo de iniciativas y 10 han afirmado estar interesados además en compartir sus experiencias propias. Estas son condiciones ideales para fomentar enfoques regionales en ALC.

La digitalización de los servicios de calibración y de verificación parece ser un tema predestinado para empezar el desarrollo con todos los INM de ALC hacia la transformación digital. Estos son los argumentos:

- i. Los INM ya tienen cierta experiencia y competencia técnica instalada sobre la cual se puede ir construyendo y desarrollando más capacidad.
- ii. A nivel regional los INM más avanzados podrán apoyar a los menos avanzados y mediante el intercambio enriquecer también su experiencia.
- iii. El uso de la digitalización ayudará a los INM a liberar recursos humanos para otras tareas y/o ayudará a cubrir más con los recursos humanos existentes.
- iv. Los servicios de los INM se profesionalizan más y es de esperar que se agilizarán los procesos de atención al cliente.
- v. La calibración, verificación y/o aprobación del modelo de los instrumentos de medición con componente digital se realizan de manera completa y confiable.
- vi. Los INM ganan experiencia en la digitalización y desarrollan así una competencia técnica interesante para la industria.
- vii. La digitalización del manejo de los datos de las mediciones crea las bases para los desarrollos actuales en la nube metrológica, así como para temas como la ciberseguridad y temas futuros como *big data* y los modelos y simulaciones metrológicas.

El tema del desarrollo de las TI en los INM para el fortalecimiento de los otros servicios y funciones de los INM como la difusión, capacitación y asesoría debe ser también tomado cuenta desde un comienzo para todos los INM de ALC. Aquí los argumentos:

- i. Los INM ya tienen cierta experiencia y competencia técnica instalada sobre la cual se puede ir construyendo y desarrollando más capacidad.
- ii. A nivel regional los INM más avanzados podrán apoyar a los menos avanzados y mediante el intercambio enriquecer también su experiencia.
- iii. Los INM están actualmente enfrentados al desafío de no poder cubrir todas las necesidades de difusión, capacitación y asesoría. Los instrumentos de las TI son clave para multiplicar los esfuerzos.
- iv. Algunos de estos servicios se podrían basar ya en la actualidad en capacidades de los INM de la región y así cubrir la demanda nacional.

El otro tema que debe ser considerado desde un comienzo con todos los INM de ALC es el desarrollo y uso de la nube metrológica con un enfoque nacional y regional. La construcción de la nube metrológica se puede realizar paso a paso, tomando en cuenta las capacidades y recursos de los INM. La base para la construcción debe ser una arquitectura de referencia regional y preferentemente mundial. Estos son los argumentos de por qué se debe considerar la nube metrológica desde un comienzo:

- i. La nube metrológica permite compartir recursos e información lo cual es beneficioso especialmente para los INM menos desarrollados, ya que pueden brindar servicios que no son capaces de ofrecer con base en sus propios laboratorios y capacidades. Se puede pensar que a través de la nube metrológica los INM den un salto significativo en su portafolio de servicios para el país.
- ii. Es necesario que desde los inicios del desarrollo hacia una metrología 4.0 la estandarización y la armonización estén presente en los actores y la nube metrológica asegurará esto. A través de la nube metrológica también se tematizará la ciberseguridad desde un inicio, lo que apoyará el fortalecimiento necesario en este tema a los INM.

Además de estos tres temas en los que se pueden y deberían involucrar todos los INM de ALC de forma individual o conjunta desde un comienzo, hay temas específicos que se deben desarrollar con los INM que ya tienen un cierto grado de desarrollo, como los de Argentina, Brasil, México y otros. Estos temas son los siguientes:

- i. capacidades metrológicas para asegurar la trazabilidad de los instrumentos de medición de las TI de última generación;
- ii. capacidades metrológicas para nuevos instrumentos y sistemas de medición de la industria 4.0, como mediciones embebidas en las máquinas, redes de sensores, impresión 3D, entre otros;
- iii. conceptos metrológicos para *big data* y para asegurar la calidad de los datos de mediciones que aportan a los sistemas de *big data*;
- iv. capacidades metrológicas para la realización de mediciones virtuales y simulaciones. Lo interesante de este tema es que los INM menos desarrollados podrían beneficiarse de los modelos y las simulaciones desarrollados por otros INM en su quehacer metrológico;
- v. conceptos metrológicos como el certificado de calibración digital y la ciberseguridad;
- vi. ofertas metrológicas para diferentes sectores como la industria 4.0, transporte, salud, energía (renovables), medio ambiente, etcétera.

En una cooperación como la del SIM, los INM menos desarrollados se beneficiarán a mediano o largo plazo de los avances de los INM más avanzados en estos temas porque podrán contar con las experiencias y el conocimiento una vez que estén preparados para aprovecharlos. Asimismo, es de esperar que algunos INM en desarrollo den saltos tecnológicos, los cuales, aunque todavía no puede predecirse cuándo ocurrirán, les permitirán participar también de estos desarrollos a corto plazo.

4. Propuestas para fortalecer las competencias de los institutos nacionales de metrología y promover su rol en la transformación digital de la economía y sociedad en América Latina y el Caribe

El interés mostrado por los INM de ALC durante el estudio es un indicador bastante robusto sobre la importancia que dan a la transformación digital y sobre su interés en avanzar en estos temas.

A su vez, el estudio ha mostrado el poco avance en la digitalización de los servicios metrologógicos y la brecha que existe entre la demanda y la oferta de servicios metrologógicos para la transformación digital. En este sentido, los INM esperan que la brecha siga creciendo en el futuro. En algunos países esto podría debilitar considerablemente el rol que los INM desempeñan y deben desempeñar si no se organizan y unen los esfuerzos para superarla.

Es por eso que se debe dar continuidad al tratamiento de estos temas en y con la región. Los objetivos a largo plazo para promover el rol de los INM en la transformación digital de la economía y sociedad en ALC deberían ser los siguientes:

- i. apoyar a la digitalización efectiva de los servicios metrologógicos de los INM existentes y nuevos;
- ii. respaldar el desarrollo de las competencias metrologógicas de los INM que apoyen la transformación digital;
- iii. potenciar el impacto de la metrología y de los INM, desarrollar el rol de referente y árbitro confiable y reconocido de los INM, y también de promotor y actor clave de la productividad, la innovación, la calidad y la competitividad de la industria y la economía.

Como se señaló en la tercera sección, los desafíos y la temática son amplios por lo que se recomienda apoyar el desarrollo de la digitalización y de las competencias metrologógicas incluyendo a todos los INM de la región paso a paso y de forma diferenciada. En los próximos dos a tres años el proceso de desarrollo debería enfocarse en lo siguiente:

- i. Actividades de información y sensibilización para todos los INM.
- ii. Intercambio regional entre metrologógicos, promotores y actores de la transformación digital, y también de la industria.
- iii. Capacitaciones, asesorías y pasantías para la digitalización de los servicios de calibración, verificación (metrología legal) y otros servicios dirigidos a todos los INM.
- iv. Desarrollo de las nubes metrologógicas a nivel regional.

- v. Desarrollo de las capacidades metrológicas de los INM más avanzados para asegurar las bases de la transformación digital.
- vi. Identificación de aliados, monitoreo de los avances y evaluación para la inclusión de temas adicionales emergentes.

En los siguientes apartados se detallan las intervenciones propuestas.

4.1. Actividades de información y sensibilización para todos los INM

- i. El SIM debería promover la sensibilización y capacitación de sus miembros en temas de la transformación digital, por ejemplo, a través del curso en línea del BID, Desafíos y oportunidades en la economía digital, y de la lectura del estudio del PTB (2017a), entre otras opciones.
- ii. El SIM debe iniciar el diálogo acerca de cómo se organizará la información sobre la metrología y la transformación digital en la página web del SIM.
- iii. El SIM debería promover la realización de un evento regional de información, sensibilización y planificación de actividades, pilotos y proyectos sobre la metrología y la transformación digital de la economía y la sociedad con participación de expertos metrólogos del NIST, NRC y PTB, así como de promotores y actores de la transformación digital como el BID. Debería contar con la participación de expertos en nuevas tecnologías digitales con los que deberían desarrollarse propuestas de pilotos para la digitalización de los servicios de calibración o verificación.
- iv. Otro resultado de esta actividad debería ser una priorización de los temas indicados en el apartado 4.3. y la definición de los temas específicos para los otros eventos regionales propuestos para 2019.
- v. El SIM debería promover y realizar eventos regionales de información e intercambio sobre temas específicos de la metrología y la transformación digital de la economía y la sociedad, por ejemplo, durante la Asamblea General del SIM. Los temas específicos se deberían definir como resultado del evento regional arriba propuesto.

4.2. Intercambio a nivel regional entre metrólogos, promotores y actores de la transformación digital, y también de la industria

- i. El SIM debería ir formando un grupo núcleo de interesados y experimentados en los temas de la transformación digital con el cual se pueda discutir la temática, identificar las necesidades y desarrollar nuevos conceptos de apoyo. Una primera lista de interesados se puede extraer de las encuestas, ya que se les pidió a los INM que listaran a los responsables y participantes en la encuesta, y a las personas de contacto para el tema de la transformación digital en el instituto.
- ii. Los INM y el SIM deben buscar y promover la participación de los metrólogos del grupo núcleo en eventos generales, nacionales o regionales, sobre transformación digital, productividad y competitividad industrial. Se deberían identificar plataforma regionales, por ejemplo, las promovidas por el BID u otros actores regionales, en donde se pueda organizar este intercambio también a mediano plazo. En esas plataformas se debería intentar lograr la creación de grupos de trabajo temáticos, con participación los INM, en los que los metrólogos podrían asumir el liderazgo.

- iii. Los INM y el SIM deberían promover la participación pasiva y activa de los metrologos del grupo núcleo en eventos generales sobre la transformación digital, productividad y competitividad industrial.
- iv. Los INM y el SIM deberían promover eventos regionales de intercambio entre metrologos, promotores, actores de la transformación digital y también de la industria sobre temas específicos de la metrología 4.0.
- v. El SIM debe evaluar si con base en el grupo núcleo de interesados crea un grupo de trabajo de metrología. A nivel del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) se ha creado un grupo de trabajo ad hoc para considerar el rol de la metrología en la mejora de la reproducibilidad de datos de investigación y temas relacionados (CIPM, 2018).

Los INM más desarrollados deben generar las capacidades metrologicas cuya necesidad se identifica en estos espacios de intercambio (véase el apartado 4.5)

4.3. Capacitaciones, asesorías, pasantías e implementación de pilotos para la digitalización de los servicios de calibración, verificación y otros servicios

- i. Los INM y el SIM deberían promover capacitaciones, asesorías y pasantías en los temas priorizados para la digitalización de los servicios de calibración, verificación y otros servicios de los INM.

Alternativamente o como complemento:

- ii. Los INM y el SIM deberían promover la implementación de pilotos y el desarrollo de los temas priorizados para la digitalización de los servicios de calibración, verificación y otros servicios de los INM siguiendo la metodología para desarrollar las competencias de organizaciones técnicas y científicas a partir de experiencias y conocimientos regionales (CABUREK, por sus siglas en inglés), que ya ha sido probada por el SIM en varios temas y ha resultado una muy eficaz. CABUREK fue desarrollada por la Organización de los Estados Americanos (OEA), SIM y PTB y se basa en el concepto de que el intercambio de conocimiento y experiencias regionales facilita la solución de desafíos que se les presentan a los países a nivel nacional. La metodología reúne ordenadamente los esfuerzos institucionales y promueve una estructura que habilita y enmarca un proceso que potencia la innovación, la orientación a la demanda de la industria, lo que permite concretar acciones y resultados en ambos planos, nacional y regional (PTB, 2015).

En el marco de un proyecto con la metodología CABUREK se escogerían tres servicios a implementar en cada país interesado, apoyados por el intercambio y acompañamiento regional. Los servicios a ser digitalizados se definirían sobre la base de un análisis de la demanda y las capacidades existentes, y con el apoyo de expertos en las TI avanzadas. Para la temática metrología 4.0 será necesario también la inyección de conocimiento y experiencias fuera de la región de ALC, que caerá en suelo preparado a través del enfoque CABUREK.

CABUREK podría gestionarse a través de un proyecto de cooperación técnica.

4.4. Desarrollo de las nubes metrológicas a nivel regional

- i. El SIM debería evaluar qué instrumentos de las TI debe implementar para la instalación y desarrollo de la Secretaría del SIM.
- ii. El SIM tendría que promover el desarrollo de un proyecto de nubes metrológicas en la región. Por un lado, mediante el apoyo al desarrollo de arquitecturas de referencia para nubes metrológicas nacionales y, por el otro lado y de forma complementaria, a través del apoyo en el desarrollo de la nube metrológica regional SIM para lo cual se tendría que incluir a todos los países de América. La nube metrológica sería un ejemplo de un bien público regional. La arquitectura de referencia de esta nube debe servir de base para las nubes metrológicas nacionales y también debe estar armonizada con las otras nubes metrológicas regionales y las internacionales que se construyan en el futuro.

4.5. Desarrollo de las capacidades metrológicas de los INM más avanzados para asegurar las bases de la transformación digital

- i. Los INM más avanzados de ALC deberían no solo acelerar el fortalecimiento y desarrollo de sus capacidades en los temas de avanzada, sino generar paquetes de oferta para las diferentes iniciativas de la transformación digital.
- ii. Los INM más desarrollados de ALC deberían compartir sus experiencias y competencias adquiridas con toda la comunidad SIM y en las actividades propuestas en los apartados 4.1., 4.2., 4.3. y 4.4.
- iii. Los INM más desarrollados de ALC deberían participar en proyectos de cooperación científica en estos temas con NIST, NRC, y también con INM avanzados de otras regiones.

4.6. Identificación de aliados, monitoreo conjunto de los avances y evaluación para la inclusión de temas adicionales emergentes

- i. Los INM de ALC deben identificar aliados para implementar esta o parte de esta estrategia. Dentro del SIM tanto el NIST como el NRC son institutos, que si bien no tienen una estrategia elaborada para enfrentar y aprovechar los desafíos y potenciales de la transformación digital, han desarrollado capacidades importantes en estos temas. Son por lo tanto fuente interesante de experiencia, conocimiento e inspiración. Por su parte, el BID tiene programas que promueven la transformación digital en ALC y han identificado el rol de los INM para y en la transformación digital como un tema interesante de promover y apoyar. Por eso, el BID ha puesto mediante esta publicación el tema sobre la mesa en la región de ALC. A su vez, el PTB ha desarrollado una estrategia para enfrentar y aprovechar los desafíos y potenciales de la transformación digital en Alemania (PTB, 2017a). Asimismo, está elaborando actualmente una estrategia para el tema de la digitalización en el marco de los proyectos de la cooperación internacional y para apoyar a la región también en estos temas. Otros aliados regionales potenciales con los que se deberían explorar posibles cooperaciones son la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la OEA.

- ii. Los INM y el SIM deberían promover la creación de un comité consultivo (de hasta 10 personas) para monitorear el avance de los diferentes proyectos e iniciativas que se implementan en la región en esta temática. En este comité deberían participar representantes del SIM, el BID, la cooperación internacional del PTB y otros interesados por identificar. Es esperable que se produzcan saltos en el desarrollo tecnológico actualmente no visibles, así como cambios sustanciales con respecto a la demanda. Adicionalmente se pueden presentar oportunidades interesantes que deben tomarse en cuenta para fortalecer el desarrollo y asegurar su sostenibilidad. Asimismo, la identificación de posibles saltos tecnológicos será crucial para evitar que la brecha de desarrollo entre los INM y la industria de su país crezca.
- iii. Se recomienda desarrollar pequeños estudios sobre el rol de la metrología 4.0 para ejemplos concretos de la industria 4.0 en ALC y para los sectores más relevantes como salud, energía, transporte, agricultura, medio ambiente y cambio climático. Uno de los productos de estos pequeños estudios podrían ser hojas informativas.
- iv. Se han identificado y mencionado en esta publicación ideas para desarrollar e innovar en metrología, que se presentan aquí sin que su viabilidad técnica y económica hayan sido realmente evaluadas. Estas son: desarrollar modelos matemáticos que permitan calibraciones en las magnitudes más relevantes en laboratorios de campo, manteniendo los niveles de incertidumbre más requeridos en el mercado; analizar con modelos matemáticos y simulaciones con base en los datos de medición existentes de forma digital para analizar y mejorar el desempeño de las mediciones en los laboratorios; asesorar a la industria para que mediante redes de sensores se pueda llegar a un mantenimiento predictivo de máquinas a fin de reducir los costos de mantenimiento y elevar la vida útil de las máquinas considerablemente (si bien esto no es algo nuevo en el mundo, podría ser de mucho impacto en ALC y para el rol de los INM); aplicar conceptos de *big data* e IA para promover la calibración y verificación preventiva de sensores, instrumentos de medición y medidores de consumo (electricidad y agua); desarrollar sistemas de medición para monitorear el rendimiento de paneles fotovoltaicos en función de los parámetros que lo influyen, a fin de determinar las acciones correctivas de mantenimiento correspondientes; aplicar la tecnología *blockchain* para asegurar la confianza en los certificados de calibración emitidos.

Para algunos aspectos de la transformación digital, la metrología es uno de los cuellos de botella. Esto resalta la importancia y el rol de los INM. Sin embargo, si los INM no pueden aportar a la solución, esta debe ser buscada en el extranjero. Esto no es algo nuevo; lo novedoso es que con la transformación digital esta solución será aún más común. Es por ello que la transformación digital, por un lado, ofrece oportunidades de desarrollo de los INM y, por el otro, puede resultar una amenaza.

El aporte, el rol y la importancia de los INM para la transformación digital dependerán de la velocidad y la profundidad con que los INM puedan lograr la digitalización de los servicios existentes, y también de la integración de los conceptos y las realidades de la transformación digital al quehacer diario y al negocio de los INM. La cooperación regional a través del SIM, y utilizando medios digitales, puede apoyar a todos los INM de ALC para que este proceso sea más efectivo y eficiente.

Referencias

CIPM (Comité Internacional de Pesas y Medidas). 2018. Decisions of the CIPM at its 107th session (junio).

Der Spiegel. 2018, Monopolwächter fürchten Absprachen zwischen Algorithmen. 3 de julio. Disponible en: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/kuenstliche-intelligenz-monopolwaechter-warnen-vor-absprachen-a-1216480.html>

García Zaballos, A. y E. Iglesias Rodríguez. 2017. Informe anual del Índice de Desarrollo de la Banda Ancha en América Latina y el Caribe. IDBA 2016. Washington, D.C.: BID. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/informe-anual-del-indice-de-desarrollo-de-la-banda-ancha-en-america-latina-y-el-caribe-idba-2016>

Navarro, J. C. 2018. El imperativo de la transformación digital. Washington, D.C.: BID. Disponible en: <https://webimages.iadb.org/publications/spanish/document/El-imperativo-de-la-transformación-digital-Una-agenda-del-BID-para-la-ciencia-y-la-innovación-empresarial-en-la-nueva-revolución-industrial.pdf>

NIST (Instituto Nacional de Normas y Tecnología). 2018. Blockchain Technology Overview. Draft NISTIR 8202. Gaithersburg, MD: NIST.

NPL (Laboratorio Nacional de Física). 2013. Metrology for the 2020s. Teddington, Reino Unido: NPL.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2016. Panorama de las Administraciones Públicas: América Latina y el Caribe 2017. París, Francia: OCDE.

PTB (Instituto Nacional de Metrología). 2015. CABUREK – Desarrollar competencias de organizaciones técnicas y científicas a partir de experiencias y conocimientos regionales. Braunschweig, Alemania: PTB.

_____. 2017a. Metrología para la digitalización de la economía y la sociedad. Braunschweig, Alemania: PTB.

_____. 2017b. First Digital Twin of a Weight. En *Annual Report 2017*. Braunschweig, Alemania: PTB.

_____. 2017c. The Digital Calibration Certificate. PTB Mitteilungen 127, Heft 4. Braunschweig, Alemania: PTB.

Thiel, F. 2018. Digital Transformation of Legal Metrology – The European Metrology Cloud. En *OIML Bulletin* Vol. LIX, N° 1, enero. París, Francia.

Wäldele, F. et al. 2004. Simulationsverfahren für die Koordinatenmesstechnik – Präsentation Technologie Transferpreis – IHK Braunschweig. Braunschweig, Alemania.

Entrevistas realizadas (2018)

Alan Steele, Director General del Consejo Nacional de Investigación (NRC) de Canadá.

Héctor Laiz, Gerente de Calidad y Ambiente del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) Argentina y Presidente del SIM, Argentina.

NIST (Instituto Nacional de Normas y Tecnología de los Estados Unidos): Ajit Jilla, Oficina de Coordinación de Programas y Oficina de Coordinación de Normas; Al Wavering, Jefe de la División de Sistemas Inteligentes del Laboratorio de Ingeniería; Claire Saundry, Directora de Asuntos Internacionales y Académicos; Jim St. Pierre, Director Adjunto del Laboratorio de Tecnologías de la Información; Matt Scholl, Jefe de la División de Seguridad Informática del Laboratorio de Tecnologías de la Información; y Simon Frechette, División de Integración de Sistemas del Laboratorio de Ingeniería.

Lars Ahrendt, Gerente de Perschmann Calibration, Alemania.

Páginas web consultadas

BID: www.iadb.org

NIST: www.nist.gov

NPL: <http://www.npl.co.uk>

NRC: www.nrc-cnrc.gc.ca

Plattform Industrie 4.0.: <https://www.plattform-i40.de>

PTB: www.ptb.de

Anexo. Nivel de conocimiento (autoevaluación) de los entrevistados en diferentes temas

Cuadro A1. Nivel de conocimiento con base en una autoevaluación sobre digitalización de los servicios de calibración de los INM

Tema	N	Nivel de conocimiento		
		A	B	C
Porcentaje de los encuestados				
Digitalización y automatización de los procesos de calibración	15	13%	53%	33%
Digitalización y automatización del monitoreo y control ambiental en los laboratorios	15	0%	67%	33%
Plataforma digital de atención al cliente	15	13%	47%	40%
Servicios de calibración de instrumentos con componente digital	15	20%	40%	40%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: A: nada de conocimiento o básico; B: conocimiento intermedio; C: conocimiento avanzado o experto.

Cuadro A2. Nivel de conocimiento con base en una autoevaluación sobre la digitalización en la metrología legal

Tema	N	Nivel de conocimiento		
		A	B	C
Porcentaje de los encuestados				
Digitalización y automatización de los procesos de verificación en los laboratorios de la autoridad central metroológica	7	14%	71%	14%
Documentación y monitoreo en línea de los servicios de verificación in situ	11	18%	55%	27%
Servicios de consulta y validación de certificados en línea	11	9%	64%	27%
Servicios de verificación de instrumentos con componente digital (<i>software</i>)	11	27%	36%	36%
Servicios de aprobación de modelo de instrumentos con componente digital (<i>software</i>)	11	36%	27%	36%

Servicios de verificación de medidores inteligentes	10	50%	10%	40%
Servicios de aprobación de modelo de medidores inteligentes	10	50%	10%	40%
Nube metrológica con acceso diferenciado para la gestión de la metrología legal (incluyendo las regulaciones, aprobación de modelo, la información de cada instrumento en uso, alarmas)	10	40%	30%	30%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: A: nada de conocimiento o básico; B: conocimiento intermedio; C: conocimiento avanzado o experto.

Cuadro A3. Nivel de conocimiento con base en una autoevaluación sobre otros servicios y funciones de los INM

Tema	N	Nivel de conocimiento		
		A	B	C
		Porcentaje de los encuestados		
Difusión y sensibilización con instrumentos TI	15	33%	60%	7%
Capacitación con instrumentos TI	15	27%	47%	27%
Asesoría a la industria con instrumentos TI	15	40%	47%	13%
Desarrollo de modelos y simulaciones metrológicas con base en datos generados en los laboratorios de los INM	15	73%	13%	13%
Participación activa de los INM en las nubes metrológicas regionales e internacionales	15	67%	27%	7%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: A: nada de conocimiento o básico; B: conocimiento intermedio; C: conocimiento avanzado o experto.

Cuadro A4. Nivel de conocimiento con base en una autoevaluación sobre el aseguramiento de las bases tecnológicas

Tema	N	Nivel de conocimiento		
		A	B	C
		Porcentaje de los encuestados		
Servicios de calibración para asegurar la trazabilidad para la tecnología 5G	15	87%	0%	13%
Servicios de calibración para asegurar la trazabilidad para la caracterización de antenas con tecnología MIMO	15	87%	7%	7%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: A: nada de conocimiento o básico; B: conocimiento intermedio; C: conocimiento avanzado o experto.

Cuadro A5. Nivel de conocimiento con base en una autoevaluación sobre instrumentos y sistemas de medición en la era digital

Tema	N	Nivel de conocimiento		
		A	B	C
Servicios de calibración, verificación y validación de sensores incorporados en máquinas	15	67%	27%	7%
Servicios de calibración, verificación y validación de redes de sensores	15	73%	13%	13%
Servicios de calibración, verificación y validación remota	15	80%	20%	0%
Servicios de calibración, verificación y validación completamente automatizada	15	73%	20%	7%
Servicios de calibración, verificación y validación de sistemas de medición integrados en procesos productivos	15	73%	27%	0%
Servicios de calibración, verificación y validación de instrumentos de medición con sensores reales e interpretación de datos virtual (por ejemplo, en la nube metrológica)	15	80%	20%	0%
Código de identificación digital único (por ejemplo, QR) para los instrumentos de medición utilizados en el ámbito regulado	15	60%	33%	7%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: A: nada de conocimiento o básico; B: conocimiento intermedio; C: conocimiento avanzado o experto.

Cuadro A6. Nivel de conocimiento con base en una autoevaluación sobre metrología y big data

Tema	N	Nivel de conocimiento		
		A	B	C
Normas de lenguaje y códigos metrológicos para big data	15	93%	7%	0%
Servicios metrológicos para el aseguramiento de la trazabilidad y confiabilidad de las mediciones que generan datos para big data	15	93%	7%	0%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: A: nada de conocimiento o básico; B: conocimiento intermedio; C: conocimiento avanzado o experto.

Cuadro A7. Nivel de conocimiento con base en una autoevaluación sobre mediciones virtuales y simulaciones

Tema	N	Nivel de conocimiento		
		A	B	C
		Porcentaje de los encuestados		
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan reducir la incertidumbre de las mediciones	15	67%	20%	13%
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan extender los periodos de calibración/verificación	15	67%	20%	13%
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan determinar la incertidumbre de mediciones complejas	15	73%	20%	7%
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan que permitan mediciones virtuales	15	80%	20%	0%
Modelos matemáticos o simulaciones que permitan el análisis de sensibilidad de los factores que influyen en las mediciones	15	67%	27%	7%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: A: nada de conocimiento o básico; B: conocimiento intermedio; C: conocimiento avanzado o experto.

Cuadro A8. Nivel de conocimiento con base en una autoevaluación sobre las nubes metrologías de acceso diferenciado

Tema	N	Nivel de conocimiento		
		A	B	C
		Porcentaje de los encuestados		
Nube metrología nacional	15	80%	20%	0%
Nube metrología regional SIM	14	86%	14%	0%
Nube metrología internacional BIPM	14	86%	7%	7%
Arquitectura de referencia para nubes metrologías en el país	14	93%	7%	0%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: A: nada de conocimiento o básico; B: conocimiento intermedio; C: conocimiento avanzado o experto.

Cuadro A9. Nivel de conocimiento con base en una autoevaluación sobre el desarrollo de conceptos metroológicos

Tema	N	Nivel de conocimiento		
		A	B	C
Función de los INM como referentes nacionales para temas de metrología y transformación digital	15	67%	20%	13%
Servicios de asesoría técnica para apoyar la transformación digital por magnitud en la industria y otros sectores	14	79%	14%	7%
Certificados de calibración y verificación digital	15	60%	33%	7%
Certificados digitales con coeficientes de sensibilidad de parámetros de medición incluidos	15	67%	27%	7%

Fuente: Elaboración propia.

Notas: A: nada de conocimiento o básico; B: conocimiento intermedio; C: conocimiento avanzado o experto.

