

DE LOS DATOS A LAS DECISIONES: LA BRECHA DE COMUNICACIÓN EN EL MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL

Dr. Restelli, Fabián^a

^aConsultor, DrRestelli@gmail.com

ICOLD Member of Tech Committee on "Applied Computational Aspects on Dams"

Miembro Titular de la Asociación Argentina para las Ciencias

Palabras clave: Monitoreo Salud Estructural; brecha de comunicación; error humano; toma de decisiones; infraestructura crítica.

RESUMEN

Los avances en ciencia de datos han ampliado las capacidades de monitoreo de infraestructuras críticas, como presas, puentes y centrales nucleares e hidroeléctricas, mediante modelos predictivos y visualizaciones avanzadas. Sin embargo, su utilidad depende de convertir los datos en información estructural comprensible y accionable. Este ensayo sostiene que la principal limitación de este proceso no es tecnológica, sino comunicacional: la brecha entre los analistas de datos y los responsables de la seguridad estructural dificulta transformar los resultados analíticos en decisiones oportunas y consistentes. En consecuencia, la interpretación del monitoreo suele permanecer poco estandarizada y excesivamente dependiente del criterio individual, lo que afecta la fiabilidad operativa.

A partir de estudios recientes y experiencias de monitoreo, se analizan las causas e implicancias de esta brecha en diferentes tipos de infraestructuras. Finalmente, se proponen cuatro estrategias de mitigación: Indicadores de Salud Estructural estandarizados, perfiles profesionales híbridos, dashboards orientados a la toma de decisiones y protocolos de respuesta vinculantes basados en datos.

ABSTRACT

Advances in data science have significantly enhanced the monitoring capabilities of critical infrastructure, including dams, bridges, and nuclear and hydropower plants, through predictive models and advanced visualization tools. However, their actual value depends on the ability to transform data into understandable and actionable structural information.

This essay argues that the main limitation of this process is not technological but communicational: the gap between data analysts and structural safety professionals hinders the translation of analytical results into timely and consistent decisions. Consequently, monitoring interpretation often remains insufficiently standardized and overly dependent on individual judgment, thereby affecting operational reliability.

Drawing on recent studies and practical monitoring experience, the paper examines the causes and implications of this gap across different types of infrastructure. Finally, it proposes four mitigation strategies: standardized Structural Health Indicators, hybrid professional profiles, decision-oriented dashboards, and binding data-driven response protocols.

1. INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos en el campo del Monitoreo de la Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés) han transformado significativamente la forma en que se observan y evalúan las grandes obras de infraestructura crítica. Obras que tradicionalmente se controlaban mediante inspecciones periódicas y mediciones discretas —*como presas, puentes de gran luz, túneles, edificios emblemáticos, centrales nucleares o hidroeléctricas*— pueden hoy observarse de forma continua, sistemática y multidimensional. El despliegue de redes de sensores, junto con el desarrollo de plataformas digitales para visualización de datos, análisis automatizado y modelado predictivo, ha permitido gestionar grandes volúmenes de información estructural en tiempo real.

Esta mayor capacidad de observación, respaldada por algoritmos de procesamiento de datos a gran escala y herramientas analíticas avanzadas, ofrece oportunidades sustanciales para mejorar los diagnósticos estructurales, las estrategias de mantenimiento preventivo y los mecanismos de respuesta durante eventos críticos. En principio, estas capacidades deberían conducir a procesos de decisión más informados, oportunos y confiables en la gestión de la seguridad estructural. Sin embargo, esta transformación digital no ha ido acompañada de una evolución equivalente en los mecanismos utilizados para interpretar, comunicar y traducir en acciones concretas el conocimiento generado por estos sistemas. Los datos, por sofisticados que sean, tienen un valor práctico limitado si no logran respaldar decisiones oportunas y técnicamente fundadas.

En numerosos programas de monitoreo, el creciente volumen de información técnica no se traduce necesariamente en mejoras equivalentes en la práctica operativa. Un caso emblemático de esta desconexión fue el colapso del puente I-35W en Minneapolis en 2007. Investigaciones posteriores mostraron que existían antecedentes y señales de alerta relevantes, pero que dicha información no se tradujo en decisiones operativas oportunas. Este caso pone de manifiesto que el desafío central no consiste únicamente en generar más datos, sino en asegurar que la información analítica se convierta en inteligencia operativa capaz de reducir el riesgo. [1].

En consecuencia, el obstáculo fundamental no reside muchas veces en la tecnología disponible en sí misma, sino en la brecha existente entre quienes producen los resultados analíticos —*analistas de datos, modeladores y especialistas en monitoreo*— y quienes deben actuar en consecuencia —*operadores de infraestructura, ingenieros estructurales, consultores y autoridades regulatorias*—. Esta brecha de comunicación dificulta la transformación del conocimiento analítico en directrices operativas claras, compartidas y accionables.

Para comprender mejor la naturaleza de este problema, resulta útil distinguir tres capas funcionales en la práctica del SHM. La primera es la medición, entendida como la captura sistemática de variables físicas mediante sensores. La segunda es el monitoreo, es decir, el seguimiento temporal de dichas variables, su almacenamiento y su presentación en reportes. Sin embargo, entre el monitoreo y la decisión efectiva existe una tercera capa, frecuentemente ausente o débilmente desarrollada en muchos sistemas actuales: el **Data Sensemaking**.

Esta tercera capa refiere a la capacidad de transformar un sistema de monitoreo en un sistema de comprensión estructural. No se limita al análisis de respuestas instrumentales, sino que procura interpretar mecanismos causales o cuasi-causales, identificar relaciones relevantes para el diagnóstico y traducir resultados analíticos en criterios de acción. En otras palabras, no se trata de acumular información (proceso de Intoxicación: intoxicación de datos), sino de convertirla en conocimiento útil para la toma de decisiones.

Este trabajo sostiene que la brecha de comunicación analizada en las secciones siguientes expresa, en esencia, la ausencia de una capa de sensemaking robusta y explícita en muchos programas contemporáneos de SHM.

2. CAUSAS SUBYACENTES DE LA BRECHA ENTRE RESULTADOS ANALÍTICOS E INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL

2.1. Complejidad y Falta de Estandarización en los Resultados

En la actualidad, no existe un marco universalmente estandarizado en el ámbito del SHM para presentar e interpretar resultados analíticos en infraestructuras críticas. Existen esfuerzos relevantes -como la norma ISO 13374, las directrices de la Federal Highway Administration para puentes o las recomendaciones de ICOLD para presas-, pero todavía no se ha consolidado un lenguaje común de alcance transversal [2]. En consecuencia, distintos equipos técnicos pueden interpretar de manera divergente una misma gráfica, un mismo indicador o un mismo conjunto de datos, ya se trate de la respuesta dinámica de un puente atirantado, los asentamientos de una presa o las vibraciones de un edificio singular.

Una causa central de esta dificultad reside en la complejidad intrínseca de los resultados analíticos contemporáneos. Técnicas como el aprendizaje automático, los modelos estadísticos multivariantes o las simulaciones por elementos finitos generan indicadores sofisticados —*patrones temporales y frecuenciales, índices de daño, análisis de tendencias*— cuya interpretación ingenieril no siempre es inmediata. Por ejemplo, una variación en la frecuencia natural de un puente atirantado puede asociarse tanto a un efecto ambiental como a un fenómeno de daño. En ausencia de un contexto estandarizado que incorpore variables como temperatura, viento o carga, la anomalía

pierde significado operativo y su interpretación queda expuesta a la subjetividad del analista.

Esta situación se agrava por la falta de un lenguaje técnico compartido para comunicar hallazgos. Distintos especialistas pueden describir un mismo fenómeno con criterios diferentes, introduciendo ambigüedad diagnóstica. En este sentido, algunos estudios recientes [3] proponen entender los datos como un lenguaje con sintaxis y semántica propias. Desde esa perspectiva, la ausencia de gramáticas compartidas y de protocolos estandarizados de recopilación e interpretación genera inconsistencias que impiden que los datos trasciendan la mera capa de monitoreo para convertirse en sensemaking compartido, es decir, en una atribución colectiva de sentido sobre el comportamiento estructural observado.

2.2. Decisiones Subjetivas y Sesgos Cognitivos

Estrechamente vinculado con lo anterior, el factor humano introduce una variabilidad significativa en la interpretación de los datos de monitoreo. Decisiones analíticas como la selección de variables, los métodos de preprocesamiento, los umbrales de anomalía o la calibración de modelos suelen estar influidas por el juicio profesional más que por procedimientos estrictamente estandarizados.

Como resultado, dos analistas que trabajen con el mismo conjunto de datos pueden arribar a conclusiones diferentes si no comparten criterios interpretativos comunes. Una variabilidad comparable se ha documentado incluso en inspecciones visuales tradicionales, donde las calificaciones asignadas a una misma estructura pueden diferir entre ingenieros en función de su formación y experiencia [4].

A ello se suman las limitaciones cognitivas inherentes a toda interpretación. Ningún analista —*ni ningún modelo*— opera con información completa, y todo marco interpretativo implica simplificaciones. En consecuencia, señales relevantes pueden ser subestimadas o malinterpretadas. Un sesgo particularmente influyente en este contexto es el sesgo de confirmación: la tendencia a privilegiar información que refuerza hipótesis previas. Así, un ingeniero puede atribuir una lectura anómala de un piezómetro a un error instrumental en lugar de considerarla como un indicio temprano de un problema, o interpretar variaciones ambientales normales en la frecuencia de un puente como evidencia de daño si ya se encuentra predispuesto a detectarlo.

Esto pone de manifiesto que la brecha de comunicación no se limita a la transmisión de información, sino que involucra también la forma en que el juicio humano moldea el significado atribuido a los resultados analíticos. En particular, el sesgo de confirmación actúa como una barrera al sensemaking: en lugar de que los datos desafíen el modelo mental del analista, es el modelo mental el que filtra los datos.

2.3. Deficiente Comunicación Interdisciplinaria

Las iniciativas de ciencia de datos aplicadas al SHM de infraestructuras críticas involucran habitualmente múltiples dominios profesionales: científicos de datos, ingenieros estructurales, hidráulicos y geotécnicos, técnicos de campo, consultores y autoridades reguladoras. En este contexto, una comunicación efectiva resulta esencial para traducir hallazgos analíticos en decisiones operativas. Sin embargo, los analistas de datos suelen producir resultados expresados en términos estadísticos o algorítmicos que los equipos de ingeniería encuentran difíciles de vincular con acciones concretas, como modificar programas de inspección, ajustar protocolos de monitoreo o imponer restricciones operativas. A su vez, los ingenieros no siempre formulan con claridad las necesidades operativas o las prioridades de seguridad, lo que puede conducir a análisis técnicamente sofisticados, pero escasamente relevantes para la gestión.

Esta desconexión genera un vacío de traducción: los resultados analíticos permanecen en el dominio matemático sin ser convertidos en conceptos físicos u operativos comprensibles para quienes deben actuar. Así, un cambio en un autovector o en un índice multivariante puede no traducirse en una formulación útil como “posible pérdida de rigidez en un sector específico” o “necesidad de intensificar la vigilancia en una zona crítica”.

La literatura ha mostrado que, en sistemas complejos de SHM, una interacción humana mal coordinada introduce redundancias, inconsistencias e incertidumbre diagnóstica [5]. En la práctica, el problema suele agravarse por flujos de información fragmentados: registros de instrumentación, informes de inspección y modelos analíticos se gestionan frecuentemente en sistemas que no se comunican entre sí. Como consecuencia, la comprensión integrada del comportamiento estructural se debilita [6]. Cuando la información permanece fragmentada, los resultados analíticos complejos se desvinculan de la narrativa necesaria para respaldar decisiones de seguridad fundamentadas. Esa es, precisamente, una de las manifestaciones más claras de la ausencia de una capa robusta de sensemaking.

2.4. Sobrecarga de datos y limitaciones de la visualización

Paradójicamente, el crecimiento de las tecnologías de monitoreo ha incorporado un nuevo desafío: la sobrecarga de datos [7]. Los sistemas modernos de adquisición —*incluyendo telemetría, drones, observaciones satelitales y registradores automáticos*— generan volúmenes de información que pueden exceder la capacidad analítica de los equipos de ingeniería. En ausencia de herramientas eficaces para filtrar, resumir y visualizar, la abundancia de datos puede obstaculizar la toma de decisiones en lugar de fortalecerla. Muchas organizaciones continúan dependiendo de hojas de cálculo o

flujos de trabajo fragmentados, lo que dificulta identificar patrones complejos o anomalías emergentes en tiempo oportuno.

Debe reconocerse, además, que no toda visualización contribuye a una mejor interpretación. Existen dashboards visualmente sofisticados, pero operativamente débiles: interfaces saturadas de gráficos, colores y actualizaciones en tiempo real que presentan los datos en bruto o apenas procesados, suponiendo erróneamente que el operador dispone del tiempo y de la capacidad cognitiva necesarios para sintetizar esa información y convertirla en una decisión.

En la práctica, un operador no necesita visualizar simultáneamente todas las series temporales disponibles, sino disponer de una representación jerarquizada y contextualizada del estado estructural. Actualmente existen recursos capaces de enriquecer esa evaluación —*diagramas causa-efecto, análisis envolventes, mapas de calor de desviaciones respecto de umbrales históricos, indicadores de alerta temprana con posibilidad de drill-down, entre otros*— que permiten traducir la complejidad multivariante en información más directamente accionable [8].

La psicología cognitiva aplicada a entornos de alta confiabilidad (High Reliability Organizations, HROs) muestra que una visualización eficaz debe reducir la carga cognitiva y favorecer la detección temprana de anomalías [9]. Desde esta perspectiva, un dashboard útil debería cumplir al menos tres condiciones: contextualizar las lecturas respecto del entorno, jerarquizar la información para mostrar primero el estado global y habilitar luego el acceso al detalle, y ofrecer una orientación prescriptiva, no meramente descriptiva. Este último aspecto representa uno de los mayores desafíos actuales, ya que requiere la participación conjunta de ingenieros estructurales, especialistas en riesgo, analistas de datos y operadores para definir de antemano escenarios plausibles, patologías esperables y respuestas asociadas [10].

Solo bajo esa lógica colaborativa el dashboard puede transformarse en una herramienta de sentido operativo. De lo contrario, cuando los datos complejos no se traducen en indicadores claros —*condiciones de alerta, índices de respuesta, resúmenes orientados a la decisión*— aumenta la probabilidad de respuestas tardías o inadecuadas. En síntesis, el objetivo de la visualización en SHM no debe ser impresionar, sino ayudar a transformar datos en decisiones.

2.5. Manifestaciones específicas de la brecha según la tipología de Infraestructura

La naturaleza del sensemaking varía según la infraestructura considerada, ya que los mecanismos de daño, los tiempos de respuesta y las consecuencias de una mala interpretación difieren sustancialmente entre dominios. Por ello, la brecha de comunicación no se manifiesta del mismo modo en todos los casos.

En el caso de presas y embalses, la dinámica suele estar dominada por procesos lentos y acumulativos —*filtraciones, subpresiones, erosión interna, sufusión, por mencionar los más relevantes*—. El riesgo no suele asociarse a un colapso súbito sin advertencia, sino a la normalización progresiva del desvío. Lecturas persistentemente anómalas pueden ser interpretadas como una nueva condición de equilibrio en lugar de ser reconocidas como señales de pérdida gradual de integridad. La falla de comunicación aparece cuando los análisis de tendencia no se traducen en una narrativa de riesgo geotécnico de mediano o largo plazo. En este contexto, enfoques de evaluación sistémica de la instrumentación resultan especialmente valiosos para superar la lectura fragmentada de sensores individuales y capturar interacciones relevantes para el diagnóstico temprano [11].

En los puentes de gran luz, especialmente atirantados o colgantes, la urgencia es más dinámica y operacional. Los sistemas de monitoreo registran cambios en parámetros modales, deformaciones y vibraciones que pueden responder tanto a variaciones ambientales como a daño real. La brecha se manifiesta, por tanto, en la dificultad para distinguir entre ambos fenómenos cuando los resultados analíticos se presentan sin el contexto que los explica. Esto puede conducir tanto a la sobre-reacción —*interpretar como daño lo que es variabilidad ambiental*— como a la sub-reacción —*desestimar una señal genuina de deterioro*—. En este dominio, la comunicación debe ser casi en tiempo real y debe expresar con claridad el significado operativo de cada desviación: acción inmediata, observación reforzada o ausencia de intervención. Los tiempos típicos de respuesta se miden, en general, en horas o días.

En las centrales nucleares y otras instalaciones de muy alto riesgo, la regulación es extrema y la cultura de seguridad se encuentra altamente formalizada. Sin embargo, la brecha aparece en la complejidad de los sistemas y en la densidad de protocolos. Aunque la capacidad de procesar grandes volúmenes de datos se ha incrementado notablemente, ello no implica automáticamente una mejor comprensión estructural ni decisiones más acertadas [12]. El riesgo principal es que información analíticamente relevante quede diluida en una masa de reportes reglamentarios y no alcance a los comités de seguridad con la claridad, prioridad y urgencia necesarias. En estos entornos, la brecha no suele residir en la ausencia de umbrales, sino en la dificultad para jerarquizar la información verdaderamente crítica.

Esta diferenciación subraya que las estrategias para cerrar la brecha no pueden ser monolíticas. Lo adecuado para una tipología de infraestructura puede resultar insuficiente o incluso contraproducente para otra. La adaptación al contexto no constituye, por tanto, un refinamiento secundario, sino una necesidad técnica.

No obstante, existe un denominador común. En todos los casos, la brecha de comunicación no se resuelve únicamente con mejores sensores, algoritmos más

sofisticados o dashboards más avanzados. Lo que subyace a sus distintas manifestaciones —*ya sea la normalización del desvío en una presa, la confusión entre daño y variabilidad ambiental en un puente, o la saturación de protocolos en una central nuclear*— es la ausencia de un trabajo interdisciplinario verdaderamente integrado.

Desde la perspectiva del sensemaking, la atribución de significado estructural no es un acto individual, sino colectivo. Ningún especialista posee por sí solo todas las competencias necesarias para traducir datos en decisiones fundadas. Se requieren equipos integrados, con perfiles complementarios, lenguaje compartido y participación conjunta en la definición de umbrales, la interpretación de anomalías y la formulación de respuestas operativas. Dado que las consecuencias de una mala interpretación resultan inaceptables cuando está en juego la seguridad estructural, cerrar esta brecha exige, ante todo, mecanismos explícitos de colaboración interdisciplinaria.

3. CONSECUENCIAS DE LA BRECHA DE COMUNICACIÓN EN LA TOMA DE DECISIONES EN SHM

La brecha de comunicación descrita constituye un riesgo tangible tanto para la seguridad estructural como para la efectividad de los programas de monitoreo en infraestructuras críticas. Su primera consecuencia aparece cuando los resultados analíticos no logran traducirse en decisiones operativas. Sistemas de monitoreo implementados con alto costo pueden generar alertas que se interpretan de manera incorrecta, dando lugar tanto a falsos negativos —*cuando se omiten señales tempranas de deterioro*— como a falsos positivos —*cuando se activan alarmas injustificadas*—. Ambos extremos deterioran la gestión del riesgo. Así, respuestas tardías, priorizaciones incorrectas del mantenimiento y deficiencias en la comunicación entre actores pueden favorecer fallos en cascada. A ello se suma el costo de la inacción: frente a datos ambiguos o mal contextualizados, la respuesta por defecto suele ser no actuar, y la llamada “parálisis por análisis” se convierte en una manifestación directa de la brecha.

Una segunda consecuencia es el uso ineficiente de la tecnología. Cuando los programas de monitoreo no producen información verdaderamente procesable, su utilidad comienza a ser cuestionada, y no son infrecuentes los casos de subutilización o abandono parcial de sistemas avanzados de instrumentación. Esto no solo implica pérdida de inversión, sino también un retroceso hacia enfoques menos sensibles y una disminución en la credibilidad de las soluciones basadas en datos.

A nivel organizacional, la dificultad recurrente para interpretar resultados analíticos complejos puede generar escepticismo frente a las técnicas avanzadas. Con el tiempo, ello favorece resistencias a la innovación, debilita la adopción de nuevas metodologías y limita la evolución de los programas de SHM hacia esquemas más integrados, predictivos y orientados a la decisión.

En conjunto, estas consecuencias pueden agruparse en tres dimensiones interrelacionadas: riesgos para la seguridad, ineficiencias operativas y pérdida de confianza en los sistemas de monitoreo estructural. En definitiva, los datos solo mejoran la seguridad cuando son interpretados de manera consistente y se traducen en acciones oportunas.

Desde esta perspectiva, muchos programas actuales de SHM continúan operando esencialmente en las dos primeras capas del proceso —*medición y monitoreo*—, mientras que la tercera, el sensemaking, queda delegada de manera implícita al juicio individual de un profesional que a menudo recibe información fragmentada, poco contextualizada y débilmente estandarizada. Esta delegación tácita constituye una fuente estructural de fragilidad en la cadena dato–decisión.

4. ESTRATEGIAS PARA CERRAR LA BRECHA DE COMUNICACIÓN

Cerrar la brecha entre resultados analíticos y toma de decisiones en SHM requiere estrategias que integren dimensiones técnicas, organizativas y cognitivas. Estas estrategias deben ser aplicables al conjunto de las infraestructuras críticas, pero suficientemente flexibles como para adaptarse a las particularidades de cada tipología.

4.1. Estandarización e Indicadores de Salud Estructural (SHI)

Un primer paso consiste en mejorar la estandarización y claridad en la comunicación de los resultados de monitoreo. En esta dirección, resulta necesario avanzar hacia una “gramática común” para los datos de SHM, que incluya convenciones de nomenclatura para sensores y variables, métricas comparables y definiciones consistentes de estados estructurales y comportamientos anómalos. La predefinición de umbrales de referencia también favorece interpretaciones más consistentes de parámetros como desplazamientos, frecuencias propias, presiones intersticiales o filtraciones.

Más allá de la nomenclatura, es fundamental desarrollar Indicadores de Salud Estructural (SHI) jerarquizados. En lugar de exponer al gestor a múltiples gráficos aislados, el sistema debe sintetizar la información en índices comprensibles y trazables, capaces de representar el estado de subsistemas o sectores críticos de la estructura. El desafío técnico reside en construir estos indicadores de manera robusta, integrando datos instrumentales, conocimiento experto y, cuando sea posible, modelos físicos. Los SHI jerarquizados constituyen, en este sentido, un vehículo privilegiado para condensar conocimiento técnico en comprensión estructural accionable.

Finalmente, la estandarización debe complementarse con transparencia analítica. Documentar el preprocesamiento, la selección de modelos y las hipótesis adoptadas mejora la trazabilidad y permite una evaluación crítica de la fiabilidad de los resultados. Diversos marcos normativos vinculados con calidad, seguridad de la información y

calidad de datos ofrecen referencias útiles para sistematizar estas prácticas, aunque su incorporación al campo del SHM aún es limitada.

4.2. Perfiles Profesionales Híbridos y Mecanismos de Implementación

El sensemaking no es una actividad completamente automatizable. Requiere profesionales capaces de operar en la interfaz entre los datos y la física estructural. Por ello, el desarrollo de perfiles híbridos —*ingenieros con competencias analíticas avanzadas y especialistas en datos con comprensión del comportamiento estructural*— constituye un componente central para institucionalizar esta tercera capa dentro de las organizaciones.

Para que la colaboración interdisciplinaria sea efectiva, no basta con reconocer su importancia: deben establecerse mecanismos concretos de implementación. Entre ellos pueden incluirse programas de formación y certificación cruzada, esquemas de rotación entre equipos de campo, ingeniería y analítica, y la conformación de células de traducción estables integradas por especialistas de perfiles complementarios. Asimismo, las plataformas colaborativas pueden incorporar espacios donde las salidas analíticas se acompañen de notas interpretativas, respuestas operativas y trazas de retroalimentación. En conjunto, estos mecanismos favorecen la construcción de un lenguaje compartido y de una memoria técnica acumulativa.

4.3. Visualización Orientada a la Toma de Decisiones

La mejora de las herramientas de visualización y gestión de datos constituye otra dimensión esencial. Tecnologías como dashboards avanzados, portales centralizados y gemelos digitales permiten integrar en una misma interfaz información instrumental, variables ambientales, inspecciones y modelos analíticos, favoreciendo una comprensión más integrada del comportamiento estructural. Sin embargo, el objetivo de estas plataformas no debe ser la mera exhibición de datos, sino la reducción de la carga cognitiva y el apoyo efectivo a la decisión.

Desde esta perspectiva, una visualización eficaz debe adoptar una estructura jerárquica. En un nivel estratégico, debe ofrecer una visión sintética del estado global de la infraestructura; en un nivel táctico, debe presentar SHI y tendencias relevantes; y en un nivel analítico, debe permitir el acceso a series temporales, espectros, correlaciones y otros datos detallados para especialistas. Esta organización por capas mejora la legibilidad, evita la saturación informativa y permite que distintos actores accedan al nivel de detalle que realmente necesitan.

En definitiva, la visualización en SHM debe concebirse como una interfaz de sensemaking: una herramienta diseñada no para mostrar más información, sino para hacerla más interpretable, contextualizada y útil para la acción.

4.4. Protocolos de Respuesta y Árboles de Decisión Basados en Datos

Las capacidades analíticas solo adquieren valor operativo cuando se articulan con protocolos de respuesta explícitos. Por ello, las organizaciones deben establecer reglas predefinidas que vinculen indicadores, tendencias o combinaciones de señales con acciones concretas de inspección, intensificación del monitoreo, restricciones operativas o intervención.

De esta manera, los *árboles de decisión basados en datos* representan una herramienta particularmente valiosa. Su función es formalizar el sensemaking al explicitar cómo determinadas combinaciones de umbrales, tendencias y correlaciones se traducen en niveles de alerta y respuestas operativas. De este modo, el paso desde el dato a la decisión deja de depender exclusivamente de interpretaciones subjetivas y se convierte en un proceso institucionalizado, trazable y susceptible de mejora continua.

Estos protocolos no deben considerarse estáticos. Por el contrario, deben revisarse periódicamente a la luz de la experiencia acumulada, del envejecimiento estructural y del análisis retrospectivo de decisiones previas. Esta revisión fortalece el aprendizaje organizacional y cierra el ciclo de retroalimentación entre operación, monitoreo y rediseño de la estrategia analítica.

En conjunto, la estandarización de resultados, el desarrollo de SHI jerarquizados, la formación de perfiles híbridos, el diseño de visualizaciones orientadas a la decisión y la implementación de protocolos vinculantes permiten reducir progresivamente la brecha entre monitoreo analítico y acción operativa.

5. CONCLUSIONES

Los avances recientes permiten superar muchas de las limitaciones tradicionales en adquisición, almacenamiento y análisis de datos. Sin embargo, la etapa final del proceso —*la traducción de resultados analíticos en decisiones operativas*— continúa dependiendo en gran medida de la interpretación humana.

Este trabajo ha examinado los factores que sostienen la brecha de comunicación en la práctica del SHM, con manifestaciones específicas según la tipología de infraestructura. La ausencia de marcos estandarizados, la complejidad de los resultados analíticos, los sesgos cognitivos, las dificultades de comunicación interdisciplinaria y las limitaciones de ciertas interfaces de visualización obstaculizan, de manera conjunta, la transformación de datos en conocimiento accionable.

Frente a este escenario, cerrar la brecha requiere algo más que mejoras tecnológicas aisladas. Resulta necesario avanzar en estrategias centradas en el factor humano y organizacional: desarrollo de marcos compartidos mediante Indicadores de Salud

Estructural, fortalecimiento de competencias interdisciplinarias a través de mecanismos concretos de implementación, adopción de visualizaciones jerárquicas y orientadas a la decisión, y establecimiento de protocolos que vinculen explícitamente el monitoreo con respuestas operativas definidas.

En consecuencia, el éxito de una iniciativa de SHM no debería medirse por la sofisticación de sus algoritmos ni por el volumen de datos generado, sino por su capacidad para contribuir a diagnósticos más confiables y a decisiones más seguras, oportunas y fundamentadas.

En este sentido, el futuro del SHM depende menos de la incorporación indiscriminada de nuevos sensores o herramientas analíticas, y más de la construcción de una capa robusta de Data Sensemaking capaz de transformar sistemas de auscultación en sistemas de comprensión del comportamiento estructural. Ello exige un cambio de enfoque: pasar de una cultura centrada en la adquisición de datos a otra orientada a su interpretación inteligente y a su traducción en acción.

En esta transición, el mayor valor profesional no residirá únicamente en acceder a más información, sino en la capacidad de formular mejores preguntas estructurales, seleccionar indicadores relevantes, reconocer relaciones significativas y convertir todo ello en decisiones prudentes.

En última instancia, la resiliencia de las infraestructuras críticas no se construye solo con sensores, algoritmos e inspecciones adecuadas, sino también con protocolos claros, diálogo interdisciplinario efectivo y una capacidad institucionalizada de atribuir sentido a los datos disponibles.

REFERENCIAS

- [1] Sibly, P. G., & Walker, A. C. (2009). I-35W Bridge Collapse: Lessons for design, inspection, and management. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Forensic Engineering*, 162(4), 157-165.
- [2] a.- ISO. (2005). *ISO 13374-1:2005 Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 1: General guidelines*. International Organization for Standardization, Geneva.
- b.- Federal Highway Administration. (2019). *Structural Health Monitoring of Bridges: A Guide for Practitioners* (FHWA-HRT-19-046). Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation.
- c.- ICOLD (2018). *Dam Surveillance Guide* (Bulletin No. 158). Paris: International Commission on Large Dams.
- [3] RUIZ, M. et al. (2025). “Data Interpretation in Structural Health Monitoring: Toward a Universal Language” The 2nd International Conference on AI Sensors and Transducers. Kuala Lumpur, Malaysia.
- [4] ALVI, I.A. (2015). “Human Factors in Dam Failures”. ASDSO Lessons Learned, pp.1-2.
- [5] SUN, Z. et al. 2023. “A Critical Review for Trustworthy and Explainable Structural Health Monitoring and Risk Prognosis of Bridges with Human-In-The-Loop” *Sustainability* 15, no. 8: 6389.
- [6] REZATEC (2023). *Geospatial Analytics for Dam Monitoring – Rezatec Dam Monitoring*.
- [7] LARA, A. & RESTELLI, F. (2024). *Dashboards de Control para SHM en Infraestructuras Críticas: Avances y Desafíos*. CAPyAH-2024.
- [8] RESTELLI, F. (2024). “Revolution of Data Visualization for the Protection of Critical Infrastructure”, ICOLD Technical Committee of Computational Aspects of Analysis and Design of Dams.
- [9] WOODS, D. & Hollnagel, E. (2006). *Joint Cognitive Systems: Patterns in Cognitive Systems Engineering*. CRC Press, p. 87-92.
- [10] RESTELLI, F. (2026). “Dashboards for Structural Health Monitoring: Toward Management Based on Advanced Metrics”, University of Florida, USA.
- [11] RESTELLI, F. (2013). “Systemic evaluation of the response of Large Dams Instrumentation”, in ICOLD 2013 Symposium - Seattle, USA
- [12] RESTELLI, F. (2024). “Calcolo ad Alte Prestazione nel Monitoraggio della Salute Strutturale”, Comité Argentino de Presas.