

TECNOLOGÍA OPERACIONAL · MINERÍA · PREPARACIÓN PARA IA

# El piso que ahora tiene que pensar

Por qué la tecnología operacional debe llegar primero a la conversación de IA en minería

*Un framework para los arquitectos OT, jefes de OT, CTOs y vicepresidentes de operaciones que vivirán con las consecuencias de la próxima propuesta de IA en la minería LATAM*

#### AUDIENCIA

Líderes OT, arquitectos, CTOs, VPs Ops

#### FOCO

Condiciones OT para IA en minería

#### REGIÓN

Minería LATAM

# Contenido

01	Treinta años en silencio, y ahora le piden pensar	3
02	La mañana en que tres proveedores discutieron y nada se arregló hasta el almuerzo	4
03	Lo que un veterano de planta escribió al reverso de una libreta	6
04	Por qué la falla vive debajo del modelo	7
05	El piso como plataforma: las cuatro capas	9
06	Dónde se quiebra el mandato	12
07	La ventana que se cierra cuando aterriza la autonomía	13
08	Lo que de verdad cuesta levantar el piso inteligente	14
09	La pregunta que su integrador debería poder responder	16
10	El rebranding, el arsenal y el piloto eterno	17
11	Qué verificar antes de firmar la próxima propuesta	18
12	El costo de llegar sin framework	19
13	Insights Clave	21
14	Fuentes	22

# 01

---

## TREINTA AÑOS EN SILENCIO, Y AHORA LE PIDEN PENSAR

Siete de cada diez ejecutivos mineros de América Latina, consultados sobre los proyectos de autonomía e IA que sus operaciones ya ejecutaron, reconocen lo mismo: los proyectos lograron solo parcialmente los objetivos de valor con los que fueron aprobados. La causa casi nunca es el modelo. Es el piso sobre el que se le pidió correr. Esa es la tesis que este paper defiende, y es la tesis que la mayoría de las propuestas de IA que llegan a una mina LATAM en 2026 están estructuradas para esquivar.

Durante treinta años, la tecnología operacional (OT)<sup>1</sup> ha sostenido la mina. Sistemas de control distribuido<sup>2</sup> operando la concentradora. Controladores lógicos programables<sup>3</sup> operando la línea de chancado. Un historian de procesos registrando cada minuto de cada turno en un archivo que el lado corporativo no abre hace quince años. El piso sostuvo la mina. Era confiable, indocumentado en términos de negocio, y mayormente invisible para el CIO y el CFO.

Hoy el CFO está preguntando cuándo el piso se vuelve inteligente.

La pregunta no es académica, y no llega con las manos vacías. Llega como un deck lleno de logos de proveedores y un cronograma de proyecto que asume que la operación ya tiene el sustrato para soportar decisiones autónomas. El integrador promete optimización sub-segundo en la recuperación de flotación. El CIO corporativo respalda la propuesta porque el directorio pidió una respuesta de IA este trimestre. Al jefe de OT lo invitan a la tercera reunión, después de que la arquitectura ya está dibujada, para confirmar que el historian "expone una API."

Esta es la contradicción con la que abre el paper. Al piso que sostuvo la mina por treinta años ahora se le pide albergar la decisión tecnológica de mayores consecuencias de la próxima década, y la gente que construyó y mantiene ese piso está llegando segunda a la conversación. El costo de esa secuencia no es abstracto. La investigación de NTT DATA con MIT Technology Review sobre autonomía en el negocio minero — una encuesta de 2025 a ejecutivos mineros de Chile, Brasil, Perú y México — encontró que el 72 % reconoce que sus proyectos logran solo parcialmente los objetivos de valor definidos. La cifra es direccional, no quirúrgica, y el §04 trata sus límites con honestidad, incluido el hecho de que es investigación nuestra. La dirección no está en duda: la mayoría de los proyectos entrega menos de lo que prometió, y cuando los proyectos se abren, el déficit se concentra

---

<sup>1</sup>OT — Tecnología Operacional (Operational Technology). El hardware, software y protocolos que controlan procesos industriales físicos, incluyendo PLCs, DCSs, sistemas SCADA y la red industrial que los conecta.

<sup>2</sup>DCS — Sistema de Control Distribuido (Distributed Control System). La arquitectura de control principal para operaciones de proceso continuo como concentradoras y refinerías.

<sup>3</sup>PLC — Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller). El dispositivo de control principal para tareas de automatización industrial discretas e híbridas, incluyendo chancado, correas transportadoras y manejo de materiales.

debajo del modelo, en el piso. Llamemos a esa población los siete-de-diez: los proyectos que entregaron solo parte de lo que prometieron.

Dos argumentos adyacentes van a intentar absorber esta tesis, y a ambos argumentos hay que cerrarles la puerta.

El primero es la pregunta de si la IA pertenece a la minería. Pertenece, y ya llegó; el transporte autónomo zanjó ese debate. La pregunta viva no es si, sino *quién define las condiciones* bajo las cuales la IA captura valor, y en el cronograma de quién.

El segundo es la narrativa de convergencia IT/OT. La convergencia describe un destino donde ambos dominios se encuentran al medio. Este paper describe quién llega a ese destino con la agenda en la mano. La distinción no es semántica. Convergencia liderada significa que la parte que trajo el framework fija los términos, y en las operaciones que la práctica ha revisado, la parte con el framework era IT. Liderazgo OT significa que OT define las precondiciones que la IA debe satisfacer, por escrito, antes de que la arquitectura se dibuje. Una mina puede estar completamente convergida y aun así sumarse a los siete-de-diez, porque la convergencia es un evento de organigrama y la falla es un evento de arquitectura. Nada de esto es un argumento contra la convergencia. Es el argumento sobre qué debe traer OT a esa convergencia, para que el encuentro al medio ocurra entre pares y no por absorción. Un whitepaper hermano de esta serie defiende el destino de la convergencia; este paper trata sobre lo que OT debe llevar en el camino.

El argumento que se avanza aquí es estructural. OT no puede esperar a que llegue una propuesta de IA para después revisarla. Debe llegar primero a la conversación, con el framework que define qué significa "listo". Sin ese framework, la conversación la escriben partes que no son dueñas de la superficie de falla, y la operación se suma a los siete-de-diez según cronograma.

Lo que sigue es ese framework, las tres tensiones que existe para resolver, una contabilidad honesta de lo que de verdad cuesta levantar el piso inteligente, y un test que el jefe de OT puede correr antes de firmar cualquier cosa.

## 02

---

### LA MAÑANA EN QUE TRES PROVEEDORES DISCUTIERON Y NADA SE ARREGLÓ HASTA EL ALMUERZO

Hagámoslo concreto antes de hacerlo general. Una concentradora de cobre en la franja del Pacífico latinoamericano, turno de día, un miércoles de fines de octubre. A las 10:42 el sistema de despacho deja de recibir las posiciones de los camiones. La planta no se detiene. Sigue corriendo sobre el último estado conocido de la mina, es decir, sobre una foto de la realidad que ya lleva minutos de atraso y sigue envejeciendo. Setpoints que asumen una mezcla de alimentación de una flota que ya se movió. La concentradora sigue procesando mineral que la capa de despacho ya no puede ver.

El gerente de planta llama a la sala de control OT. El líder OT revisa primero la red industrial, porque ahí es donde el líder OT revisa siempre primero. El backbone de fibra está en línea.

El enlace de microondas al nodo remoto de despacho muestra verde. Las radios están vivas. Los datos no están llegando.

La causa está una capa más arriba y es invisible desde la vista de red. El gateway que traduce la telemetría de los camiones desde el protocolo de terreno al formato de mensajes del sistema de despacho dejó de acusar recibo de los paquetes. No está caído. Está aceptando conexiones y descartando silenciosamente los payloads, que es el peor modo de falla que un arquitecto OT conoce, porque todas las luces de monitoreo se quedan en verde mientras los datos se detienen.

El líder OT abre un ticket con el proveedor del SCADA<sup>4</sup>, porque el gateway queda dentro del alcance del contrato SCADA en el diagrama de arquitectura. El proveedor del SCADA inspecciona el enlace, lo encuentra sano, y deriva el ticket al integrador de red, porque "la pérdida de payload es un problema de transporte." El integrador de red mide el transporte, encuentra cero pérdida de paquetes en el enlace mismo, y deriva el ticket al proveedor de despacho, porque "los datos salen íntegros de nuestra frontera." El proveedor de despacho confirma que no está recibiendo nada y deriva el ticket de vuelta hacia el gateway del SCADA. Pasan noventa minutos. Tres proveedores, cada uno correcto dentro de su propia frontera, la corrección de cada uno terminando exactamente en la línea de contrato donde empieza la del siguiente.

El gateway lo reinicia a las 12:15 el líder OT, que finalmente le corta la energía por intuición y no por diagnóstico. Para entonces la planta corrió casi dos horas mezclando contra un modelo de mina obsoleto. La pérdida no aparece como una línea dramática en un dashboard. Aparece como un número de recuperación levemente peor ese trimestre, distribuido invisiblemente entre cientos de ciclos de camión que fueron al acopio equivocado.

Ningún proveedor tuvo la culpa. Cada uno cumplió exactamente su alcance. La falla vivía en la intersección de tres contratos, y la intersección no tenía dueño. El líder OT tenía, en principio, el mandato para actuar ahí. En la práctica tenía un teléfono fijo, tres líneas de soporte, un cronómetro, y ninguna autoridad contractual para obligar a ninguno de los tres a tratar como urgente un problema que ninguno poseía.

Retenga esta escena. Cuando la propuesta de optimización de recuperación con IA llegue el mes siguiente, prometiendo ajuste de setpoints sub-segundo en este mismo circuito, la pregunta que importa no es si el modelo es bueno. La pregunta es quién resuelve la próxima falla silenciosa de gateway dentro de la ventana sub-segundo que la arquitectura de IA asume que existe. La propuesta no va a responder esa pregunta, porque nadie que haya hecho alguna vez esa llamada de las 10:42 estaba en la sala cuando la propuesta se escribió.

Este es el sustrato sobre el que la conversación de IA realmente aterriza. Hasta que el sustrato se nombre con esta precisión, la conversación es ficción con presupuesto.

---

<sup>4</sup>SCADA — Supervisión, Control y Adquisición de Datos (Supervisory Control and Data Acquisition). La capa supervisora que agrega datos de PLCs y DCSs y los presenta a los operadores.

## 03

## LO QUE UN VETERANO DE PLANTA ESCRIBIÓ AL REVERSO DE UNA LIBRETA

El caso ancla aquí, con una persona y no con un sistema. El vicepresidente de Operaciones de un productor de cobre grande de LATAM, treinta años en el circuito húmedo, formado en control de procesos antes de que "control de procesos" le reportara a alguien con "digital" en el cargo. Le presentaron una propuesta de optimización de recuperación con IA. El proyecto lo patrocinaba el CIO corporativo y lo había escrito un integrador asociado con dos proveedores de plataformas de IA. El beneficio prometido se expresaba en puntos de recuperación, como beneficio anual recurrente de millones de dólares.

El VP hizo tres preguntas en la reunión de kickoff, y el proyecto perdió el impulso en el tiempo que tomó hacerlas. Las preguntas se reproducen aquí porque son lo más cercano a un diagnóstico portátil que este paper puede entregarle a un lector, y porque cada una de ellas es una pregunta de arquitectura vestida con ropa de pregunta de negocio.

“Primero. ¿Quién es dueño de la calidad de datos de las sondas de pH que el agente está leyendo? No el historian que guarda el número. El programa físico de calibración en terreno. Nómbrame a la persona y dígame cuándo se calibró cada sonda por última vez.” “Segundo. Cuando el agente recomiende un setpoint de cal a las tres de la mañana, y el operador lo siga, y el banco salga de especificación, ¿quién se sienta en la revisión de seguridad la semana siguiente? ¿El operador que apretó el botón? ¿El integrador? ¿El modelo? Muéstreme el nombre en la línea que dice 'autorizado'.” “Tercero. ¿Qué le pasa a esta arquitectura cuando su contrato termine en dieciocho meses? ¿El valor se transfiere a mi equipo, o se va por la puerta con sus ingenieros y sus laptops?”

— VP de Operaciones, productor de cobre, LATAM

Ninguna de las tres pudo responderse en la sala. El integrador prometió volver con respuestas, que es lo que los integradores prometen cuando una pregunta expuso algo que la propuesta no contenía. El jefe de OT, convocado para validar la arquitectura técnica, reconoció las tres preguntas al instante. Eran las preguntas que él no había logrado articular en sus propias reuniones, la incomodidad que venía cargando en cada conversación de IA durante dos años sin conseguir comprimirla en un lenguaje que un CIO tomara en serio.

Le pidió al VP una sesión de trabajo. Pasaron una tarde frente a una pizarra, y el jefe de OT se fue con un esquema de una página al reverso de una libreta: cuatro condiciones, listadas de arriba hacia abajo, con flechas mostrando qué exigía cada una de la que tenía debajo. No cuatro tecnologías. Cuatro condiciones que cualquier tecnología tendría que satisfacer.

Ese esquema se convirtió en el borrador de trabajo de lo que la práctica minera de NTT DATA hoy llama PISO<sup>5</sup>, la Platform for Intelligence on Operational Systems. El acrónimo no es un accidente: PISO significa, literalmente, piso — el suelo de la operación. El mismo piso con el que abre el resumen ejecutivo de cada whitepaper PISO: *el piso sostuvo la mina por treinta años; es hora de que también piense*. El esquema nombra con qué necesita pensar.

El VP no autorizó la propuesta de IA original. Autorizó un programa de cimientos contra las cuatro condiciones, seis meses, con el proyecto de IA deliberadamente resecuenciado al segundo año, detrás del programa de cimientos. La decisión le costó a la operación un trimestre de “avance en IA” reportable al directorio, y el CIO no quedó contento. Dieciocho meses después la operación desplegó la optimización de recuperación a escala, sobre un sustrato capaz de defenderla. El beneficio prometido se materializó y se sostuvo. La arquitectura sobrevivió al término del contrato del integrador, porque el programa de cimientos se había escrito para que así fuera.

Este es el momento de reconocimiento, y su lección no es que los frameworks son útiles. Es que este framework no se inventó en un laboratorio de investigación para bajárselo a los operadores. Se le hizo ingeniería inversa a las preguntas que un veterano de treinta años hace cuando la propuesta aterriza en su escritorio y él es quien va a sentarse en la revisión de seguridad cuando algo salga mal. El framework es el propio conocimiento de OT, por fin escrito en una forma que sobrevive a la reunión.

## 04

### POR QUÉ LA FALLA VIVE DEBAJO DEL MODELO

Retrocedamos del caso al patrón, porque los buenos instintos de un VP son una anécdota y la tesis de este paper es estructural. El patrón se repite en las operaciones con las que la práctica ha trabajado durante los últimos tres años. La propuesta llega escrita en el lenguaje del modelo: volúmenes de datos de entrenamiento, latencia de inferencia, mejora de recuperación, horizonte de optimización. La operación acepta la propuesta en el mismo lenguaje, porque el lenguaje del modelo es el del memo que recibió el directorio. Dieciocho meses después el proyecto está desactivado o silenciosamente degradado, y el post-mortem devuelve el mismo hallazgo incómodo: el modelo rindió exactamente según especificación sobre los inputs que se le entregaron. El problema eran los inputs.

La falla estaba debajo del modelo. Estaba en el sustrato.

Una palabra sobre la cifra de los siete-de-diez, porque un lector OT cuidadoso hace bien en interrogarla antes de construir nada encima. Viene de *Autonomía en el negocio minero: más allá de la tecnología, el desafío del talento y la cultura*, investigación que NTT DATA condujo con MIT Technology Review en operaciones mineras de Chile, Brasil, Perú y México, publicada a fines de 2025. El hallazgo, enunciado con precisión: el 72 % de los ejecutivos encuestados reconoce que sus proyectos de autonomía e IA logran solo parcialmente los

<sup>5</sup>PISO — Platform for Intelligence on Operational Systems. El framework de NTT DATA Mining & Resources que articula las cuatro capas codependientes requeridas para que la inteligencia operacional sea sostenible en una operación minera. El acrónimo es, deliberadamente, la palabra piso.

objetivos de valor definidos. Tres límites honestos se le adjuntan. Son datos de encuesta — ejecutivos reportando sobre sus propios portafolios, no una medición auditada de resultados de proyecto. “Lograr parcialmente” es un umbral, no una constante física; cuenta al proyecto que entregó la mitad de su caso de negocio junto al que entregó casi todo. Y es investigación nuestra: NTT DATA vende remedios del tipo que este paper describe, y el lector debería ponderar la cifra como el §09 recomienda ponderar la promesa de cualquier parte proponente. Nada de esto rescata al optimista. Mediciones independientes cross-industria aterrizan en el mismo territorio: un estudio de 2025 a más de 1.250 ejecutivos senior indica que en torno al 60 % de las compañías no genera valor material de la IA pese a inversión continua, y que solo cerca del 5 % crea valor sustancial a escala. Sea la tasa real en minería sesenta por ciento o setenta y cinco, es alta.

El hallazgo más durable del estudio no es el porcentaje. Es lo que los mismos ejecutivos nombraron cuando se les preguntó qué bloquea la implementación. La resistencia al cambio encabezó la lista, nombrada por el 27,5 % de los encuestados. La falta de talento especializado siguió con 14,5 %. La confiabilidad tecnológica — aquello sobre lo que las propuestas se escriben — quedó atrás, con 11,6 %. Los ejecutivos que corren estos proyectos están reportando, en sus propias palabras, que las barreras dominantes son organizacionales, no técnicas. La variable discriminante no está en el modelo ni en el proveedor. Está en el estado de un número pequeño de condiciones en la operación que *recibe* el proyecto. El patrón que la práctica ha visto en sus propios engagements es consistente con lo que los ejecutivos reportan: donde esas condiciones estaban coherentemente activas, el proyecto aterrizó; donde una o más estaba ausente, el proyecto falló de formas que en el dashboard se leen como fallas de modelo, pero no lo eran.

La frase que carga el peso es **coherentemente activa**. No “presente.” No “en el roadmap.” No “documentada en el listado maestro de sistemas.” Coherentemente activa significa tres cosas a la vez: la condición opera en el día a día, tiene un dueño único con nombre y con la autoridad para mantenerla así, y es observable, es decir, alguien puede mostrarle su estado hoy sin agendar un workshop. Un programa de integridad de datos que existe como lámina no está coherentemente activo. Un comité de gobernanza que sesiona trimestralmente no está coherentemente activo. Un régimen de calibración que estaba al día en 2022 no está coherentemente activo en 2026. La condición tiene que vivir en la operación, no en el deck.

Esta es la tesis arquitectónica sobre la que PISO está construido, y es la tesis que decide si el próximo proyecto se suma a los siete-de-diez. Las condiciones que determinan si un proyecto de IA en una mina captura valor no están en el modelo ni en el proveedor. Están en el piso. Hasta que el piso se describa con la misma precisión con la que se describe el modelo, la conversación no puede ser productiva, porque los dos lados no están discutiendo el mismo sistema.

## LAS CUATRO CAPAS PISO

Platform for Intelligence on Operational Systems — cuatro condiciones codependientes, activadas de abajo hacia arriba.



*Ninguna capa entrega valor en aislamiento — el sistema colapsa al modo de falla de su capa más débil.*

**Figura 1** Las cuatro capas PISO, apiladas desde el sustrato operacional hasta el learning loop. Cada capa depende de la que tiene debajo. La ausencia en cualquier capa se propaga hacia arriba y desactiva el valor de todas las capas superiores — por eso un modelo fuerte sobre un sustrato débil falla con la misma confiabilidad que un modelo débil.

La próxima sección nombra las condiciones, y le entrega a cada una un gancho que el arquitecto OT puede llevar a una evaluación de proveedores el lunes.

# 05

## EL PISO COMO PLATAFORMA: LAS CUATRO CAPAS

PISO nombra cuatro capas, ordenadas desde la más fundacional hasta la más cercana al agente. Cada una se define por lo que requiere para estar coherentemente activa, no por el producto que la implementa, porque el producto varía según la operación y la condición no. Cada una trae un gancho de evaluación de proveedores: lo específico que hay que exigirle a cualquier propuesta que dice abordar la capa, formulado de modo que una respuesta vaga sea visiblemente vaga.

El conteo de cuatro capas se hereda del framework fuente — el whitepaper PISO Pillar 01, NTT DATA Mining & Resources — y no se inventa aquí; es la estructura canónica, no una taxonomía del autor.

**Capa 1 — Integridad de datos del sustrato operacional.** Cada lectura que el agente consume debe trazar a una medición física con registro de calibración vigente, banda de incertidumbre

documentada, y un régimen de detección de fallas que distinga un cero real de un sensor muerto reportando cero. Los datos maestros (equipo, material, ubicación, etapa de proceso) deben estar canónicamente identificados en todos los sistemas que el agente lee, de modo que "Mill 3" en el historial, "ML-003" en el sistema de mantenimiento y "Molino 3" en la capa de despacho sean demostrablemente la misma máquina. El sustrato no puede mentirle al modelo, y cuando no tiene respuesta debe decir "sin datos", no "0". La escala de lo que las operaciones no saben de su propio sustrato se subestima de forma rutinaria: cuando una instalación industrial mapeó sus flujos de datos operacionales preparándose para IA, encontró 139 conexiones de datos OT, muchas de ellas previamente desconocidas para la organización. *Gancho de evaluación: pídale a la parte proponente que muestre la cobertura de calibración y la distribución de antigüedad de la lista exacta de tags que el agente va a leer. Si nunca han visto su lista de tags, están proponiendo contra un sustrato imaginado.*

**Capa 2 — Gobernanza y mandato.** Cada acción impulsada por IA debe trazar a un decisor con nombre y autoridad escrita para autorizarla al nivel de autonomía correspondiente. Operador, supervisor, gerente de planta: el mandato se escribe antes de que el proyecto parta, no se improvisa cuando el banco sale de especificación a las tres de la mañana. Las responsabilidades de seguridad, medioambiente y ESG<sup>6</sup> mapean a roles, no a sistemas, porque un sistema no puede sentarse en una revisión de seguridad. Un agente de IA sin mandato de gobernanza es un motor de recomendaciones haciéndose pasar por un motor de acciones, y la suplantación se descubre en el peor momento posible. *Gancho de evaluación: pregunte quién está nombrado en la línea que autoriza un cambio autónomo de setpoint, y qué pasa con esa autorización cuando la recomendación está equivocada. Si la respuesta es un sistema y no una persona, la Capa 2 está vacía.*

**Capa 3 — Conectividad soberana y arquitectura de decisión.** Esta es la capa que el arquitecto OT conoce en el cuerpo, y la que las propuestas de IA menos entienden. La operación debe poder actuar sobre sus propios datos, a su propia latencia, sin depender de una nube de proveedor cuyo acuerdo de nivel de servicio se escribió para un dashboard SaaS, no para un lazo de control. "Fibra al rajo" no es un eslogan; es un presupuesto de ancho de banda, una topología de redundancia y una cifra de latencia bajo falla. El punto de referencia es real y regional: el centro Copper Advanced Services de BHP en Santiago — inaugurado en octubre de 2024 con una inversión de US\$48,3 millones — coordina Spence y Escondida desde más de mil kilómetros de distancia, ingiriendo unos 5,4 terabytes de datos operacionales al día por fibra dedicada entre Antofagasta y Santiago. Una arquitectura así no es una compra de conectividad. Es una arquitectura de decisión: rutas de respaldo ingenierizadas, y un presupuesto de latencia por lazo de decisión. La pregunta de arquitectura no es "¿hay conectividad?". Es "¿cuál es la latencia del lazo de decisión desde el sensor hasta el setpoint cuando la fibra primaria se corta y el tráfico conmuta a la ruta secundaria, y de nuevo cuando el enlace de última milla se cae a las 4 AM en una tormenta?". Una nube de proveedor que da la vuelta en noventa segundos no puede ser el sustrato de una acción de control que debe cerrar en uno. Los derechos de decisión tienen que arquitecturarse por lazo: el lazo de control actúa local y autónomamente dentro de una envolvente acotada, el lazo supervisorio llega más lejos, el lazo de planificación puede tolerar la latencia de la nube porque no corre en segundos. *Gancho de evaluación: pídale a la parte proponente que dibuje la ruta de datos de una decisión de setpoint y la anote con latencia bajo falla del enlace primario. Si el dibujo asume que la nube siempre está alcanzable a baja latencia, esa arquitectura nunca conoció su rajo.*

<sup>6</sup>ESG — Ambiental, Social y Gobernanza (Environmental, Social, and Governance). El régimen de reporte y responsabilidad que crecientemente exige linaje auditable desde la medición física hasta la presentación regulatoria.

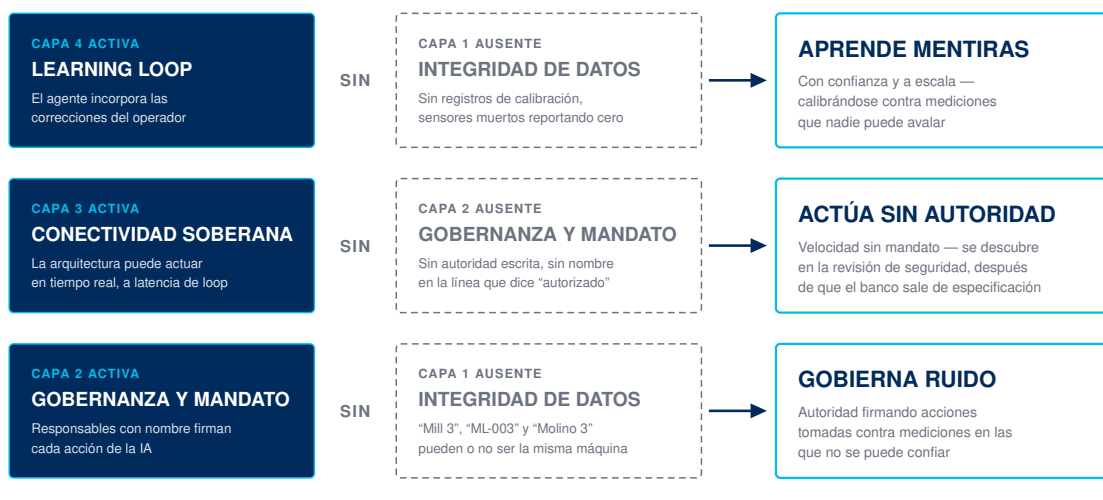
**Capa 4 — Learning loop y calibración continua.** El agente debe observar las correcciones que los operadores humanos aplican a sus recomendaciones e incorporarlas de vuelta a su calibración. Sin este lazo el agente nunca aprende en qué se está equivocando; acumula un modelo privado que deriva respecto de la práctica real de la operación, y la deriva permanece invisible hasta que una métrica acumulada fuerza una investigación que llega un trimestre tarde. El learning loop es el mecanismo que mantiene la confianza del agente anclada a la realidad física y no a su propia historia. *Gancho de evaluación: pregunte cómo un override del operador el martes cambia la recomendación del miércoles. Si los overrides se registran pero nunca cierran el lazo, el agente no está aprendiendo; está repitiendo.*

La codependencia es la parte que el resumen ejecutivo siempre deja caer, y es la parte que más importa. La Capa 4 sin la Capa 1 aprende mentiras, con confianza y a escala. La Capa 3 sin la Capa 2 actúa a velocidad sin la autoridad para estar actuando. La Capa 2 sin la Capa 1 gobierna ruido, firmando acciones tomadas contra mediciones que nadie puede avalar. Las capas no son un menú de pilares a elegir según presupuesto. Son condiciones que deben estar coherentemente activas juntas, o el sistema completo colapsa al modo de falla de su capa más débil.

Esta es la tesis arquitectónica central del paper, y es la línea que vale la pena citar en la próxima reunión de liderazgo. **Ninguna capa entrega valor en aislamiento.** Un arsenal tecnológico OT que no se apoya en las cuatro a la vez no es un piso inteligente. Es infraestructura esperando ser mal usada a la velocidad de un lazo de control.

### LA CODEPENDENCIA — LO QUE PRODUCE LA AUSENCIA

Cada falla de abajo se lee como "el modelo no funcionó" en el dashboard. Ninguna es una falla del modelo.



*Las capas no son un menú a elegir según presupuesto — son condiciones que deben estar coherentemente activas juntas.*

**Figura 2** La matriz de codependencia. Cada capa está anotada con el modo de falla específico que emerge cuando la capa inferior está ausente: aprende mentiras, actúa sin autoridad, gobierna ruido. Las celdas fuera de la diagonal son las fallas que más comúnmente se confunden con "el modelo no funcionó".

# 06

---

## DÓNDE SE QUIEBRA EL MANDATO

PISO nombra las condiciones que deben estar activas. Esta sección nombra lo que específicamente tiende a no estarlo, en las minas LATAM, y por qué ningún proveedor de IA lo va a arreglar por cuenta de la operación. Son tres. Ninguna es un problema de tecnología. Las tres son problemas de arquitectura organizacional y gobernanza, y esa distinción no es un adorno retórico; determina el remedio. Un problema de tecnología se disuelve cuando se instala la tecnología correcta. Estos problemas no. Son estructurales, enraizados en cómo están dispuestos los contratos y la autoridad, y persisten a través de cualquier cantidad de upgrades de plataforma hasta que alguien cambia la disposición. Esa es la diferencia entre un problema del que se puede salir comprando y uno del que hay que salir arquitecturando.

**Fragmentación.** La red industrial es un contrato. El SCADA es un segundo. El sistema de despacho es un tercero. El historial a veces está dentro del SCADA, a veces es su propio contrato, a veces es inquilino del dominio de IT corporativo. Cuando algo falla en la intersección de dos o más, como le pasó al gateway del §02, el problema circula entre proveedores, cada uno cumpliendo dentro de su alcance, la intersección sin dueño. El remedio no es un "Director de Convergencia IT/OT" agregado al organigrama; una caja nueva que no es dueña de nada no cambia nada. El remedio es una cláusula de contrato. La próxima vez que cualquiera de esos tres contratos se renueve, lleva un término de responsabilidad de intersección: un dueño de integración con nombre, un tiempo máximo de actuación ante fallas entre fronteras, y una cláusula que convierte "esa es la frontera del otro proveedor" en un incumplimiento y no en una defensa. La fragmentación se resuelve en la mesa de abastecimiento, no en la sala de reuniones.

**Velocidad.** El negocio ahora espera tiempos de respuesta que la estructura de escalamiento de la operación no puede producir. Una falla que toca a tres proveedores y a una mesa de ayuda de IT corporativo se resuelve en horas. El lazo de control que la IA pretende optimizar cierra en segundos. La brecha no es tecnológica; es una brecha de arquitectura de decisión, y es la misma brecha que la Capa 3 existe para cerrar: quién puede actuar, sobre qué sistema, a qué nivel de autonomía, sin pasar por una cadena cuya latencia invalida la relación de la operación con el tiempo real. Una arquitectura de IA desplegada sobre una brecha de velocidad no resuelta simplemente hereda la latencia de escalamiento de la operación, lo que significa que no funciona, sin importar qué tan rápido infiera el modelo. El remedio es una tabla de autonomía explícita, escrita y firmada: para cada clase de decisión, el actor, la envolvente acotada dentro de la cual puede actuar sin escalar, y el gatillo que fuerza el escalamiento. La tabla es el instrumento de OT, y escribirla es trabajo de OT.

**Identidad.** Esta es la tensión que OT más necesita escuchar sobre sí misma, y es la que enmarca a las otras como resolubles o terminales. IT llega con una propuesta de IA porque IT lleva dos años construyendo propuestas; proponer es su movimiento nativo. OT llega con conocimiento de proceso, instinto operacional, y treinta años de evidencia sobre qué se sostiene en el piso y qué falla a las 4 AM. Con lo que OT no llega es con una propuesta. Cuando la reunión ocurre, el lado que trae la propuesta fija la agenda, y OT queda como revisor técnico de un proyecto que no diseñó. La operación entonces acepta una secuencia

que le entrega al proveedor de IA la plataforma antes de que el piso haya sido descrito, y los siete-de-diez empiezan a compilar el próximo caso de estudio. Recuerde lo que los ejecutivos del estudio regional nombraron como barrera principal: la resistencia al cambio, por delante del talento, muy por delante de la tecnología. La tensión de identidad es esa barrera vista desde adentro — un dominio que conoce el piso mejor que nadie, estructuralmente posicionado para reaccionar en vez de para escribir.

El remedio para la tensión de identidad no es, enfáticamente, que OT aprenda a hablar más fuerte que IT en vocabulario de IA. OT no es un subconjunto de IT con restricciones extra de latencia; es una disciplina de ingeniería distinta, con su propia cultura, sus propios modos de falla y su propia memoria de treinta años, y en el momento en que intenta ganar en los términos de IT pierde el juicio que lo distinguía. Tampoco es el remedio resistirse a la convergencia que el resto del negocio está pidiendo con razón: una convergencia donde un dominio escribe y el otro revisa no es convergencia — es absorción con mejor branding. El framework es lo que convierte la misma reunión en una negociación entre iguales. El remedio es que OT llegue a la reunión con el framework que nombra las condiciones que la operación le exige satisfacer a la IA, de modo que la propuesta se evalúe contra la realidad del piso y no el piso contra los supuestos de la propuesta. PISO es uno de esos frameworks. No es el único que podría funcionar. Lo no negociable es que OT llegue con *un* framework, que esté escrito antes de la reunión, y que la dirección de evaluación corra del piso hacia la propuesta, no al revés.

# 07

---

## LA VENTANA QUE SE CIERRA CUANDO ATERRIZA LA AUTONOMÍA

El caso para que OT llegue con un framework ha sido cierto por una década. Lo que cambió en 2026 es el costo de llegar sin uno. Tres fuerzas convergen en los próximos dos a tres años, y cada una endurece la asimetría contra las operaciones que esperan.

La primera es la autonomía cruzando desde el transporte hacia el resto de la operación. El transporte autónomo fue la prueba de concepto que la industria ya absorbió; la industria ya tiene su manual público: la guía de implementación de sistemas autónomos del Global Mining Guidelines Group, ya en su segunda versión. La frontera se movió a la operación integrada y asistida por IA de toda la cadena de valor, y la evidencia regional ya no es hipotética: los materiales del site tour de cobre de BHP en Chile (noviembre de 2024) trazan una ruta hacia más de 500 kilotoneladas de cobre incremental en Escondida hacia el año fiscal 2031 vía optimización del plan minero e iniciativas de concentradora; en paralelo, al BHP Operating System — el marco de excelencia operacional al que la operación asistida por IA se conecta — se le acreditan cerca de mil millones de dólares en ahorros acumulados en Escondida desde su despliegue. El hecho arquitectónico que importa: una vez que un lazo de control autónomo está en producción, instalarle gobernanza retroactivamente cuesta varias veces lo que habría costado instalarla antes. El mandato de la Capa 2 tiene que escribirse antes de que la arquitectura de la Capa 3 se construya y energice, o la operación hereda un sistema autónomo corriendo sin autoridad documentada para hacerle override. PISO trata este como el caso canónico de secuencia, porque es el que se vuelve irrecuperable más rápido.

La segunda es el régimen de reporte en torno a la telemetría ESG. La dirección de viaje en Chile, Perú y Brasil es hacia el linaje auditable: la expectativa de que una cifra presentada a un regulador o a un inversionista pueda trazarse hacia atrás, a través de los sistemas que la computaron, hasta la medición física que la originó. Un agente de IA que produce recomendaciones contra un sustrato no auditado también produce, aguas abajo, divulgaciones contra un sustrato no auditado. El costo de esa exposición deja de ser hipotético el día en que el primer desafío regulatorio o de inversionistas fundado en linaje de decisiones de IA siente el precedente, y el resto de la industria pasa los dos años siguientes corrigiendo hacia él. La Capa 1 no es solo una precondition para el modelo; se está volviendo una precondition para la licencia para operar.

La tercera es el mandato corporativo de IA mismo. Los directorios de las operaciones mineras LATAM reciben una versión del mismo memo cada trimestre: desplieguen IA, capturen la productividad, o expliquen a los inversionistas por qué su par de la industria lo hizo y ustedes no. La presión ya no es abstracta, y se está firmando en la cúspide de la industria: en noviembre de 2025, Codelco — el principal productor estatal de cobre — firmó en Tokio una alianza estratégica “Future of Mining” con NTT DATA, abarcando conectividad avanzada, IA generativa, robótica, operaciones autónomas y gemelos digitales. (La divulgación corre en ambas direcciones: esa alianza es nuestra, y se cita aquí como evidencia de dónde se está fijando la agenda, no como validación independiente.) Cuando acuerdos de ese alcance se firman a nivel de directorio, las operaciones debajo heredan cronogramas. La ventana en la que OT puede fijar la agenda es la angosta que queda entre el memo del directorio y la primera firma de proyecto. Una vez que la firma está en la página, la agenda queda fijada en el framework de otro, y el piso queda corriendo permanentemente desde atrás.

La convergencia de estas tres es la razón por la que este paper se escribe en 2026 y no en 2024. En 2022, el costo de llegar sin framework era un piloto atrasado. En 2027, el costo es una operación que no puede defender sus propias decisiones autónomas ante un regulador, ante un comité de seguridad, o ante el sucesor del integrador. El precio de esperar ya no se mide en upside perdido. Se mide en indefendibilidad.

# 08

---

## LO QUE DE VERDAD CUESTA LEVANTAR EL PISO INTELIGENTE

Las propuestas son precisas sobre el beneficio y vagas sobre la cuenta. Citan la mejora de recuperación con un decimal y dejan el costo del sustrato que hace posible esa mejora como un detalle de implementación. Un arquitecto OT que ha corrido programas de capital sabe que el detalle de implementación es donde el proyecto vive o muere, así que esta sección hace la contabilidad que la propuesta se salta, con inferencia on-premise como ejemplo desarrollado, porque on-prem es lo que la soberanía de la Capa 3 usualmente exige y es el ítem que más se subestima.

Hay tres componentes de costo, y corresponden a un desembolso de capital único contra una carga operacional recurrente que ese desembolso crea silenciosamente.

El primero es el silicio, y es el único que la propuesta usualmente nombra. El appliance de inferencia en el borde, la GPU o el acelerador, el gabinete robusto especificado para el polvo y la oscilación térmica de una sala de planta y no de un data center. Es un número de capital, es finito, y es el más chico de los tres en un horizonte de cinco años. Una operación que presupuesta solo el silicio presupuestó apenas la punta del iceberg.

El segundo es la ingeniería de sustento, y es el que convierte un piloto exitoso en un activo varado. Un stack de inferencia on-premise no es un microondas. Necesita parchado en un calendario que no rompa el ambiente de control, recalibración de modelos a medida que el cuerpo mineralizado y el circuito derivan respecto de las condiciones con las que el modelo se entrenó, y un régimen de monitoreo que detecte la degradación silenciosa antes de que lo haga una métrica acumulada. El superintendente de planta no firmó para correr una práctica de MLOps, y si nadie está financiado para correrla, el modelo decae en su lugar mientras todas las luces de estado siguen verdes — que es precisamente el modo de falla del §02 reubicado de la red al modelo. Esto es OPEX recurrente, escala con el número de modelos desplegados, y es el componente que la propuesta casi nunca cuantifica.

El tercero es la segunda fuente, y es el que OT entiende por instinto y la propuesta casi nunca incluye. Un único appliance de borde con el stack de un único proveedor y un único especialista que sabe recuperarlo es un punto único de falla disfrazado de innovación. Soberanía en el sentido de la Capa 3 significa que la operación puede seguir decidiendo cuando la ruta primaria de inferencia está caída: un appliance de respaldo, un modo degradado documentado que devuelve el control a la lógica de control determinística, y un segundo ingeniero capaz de levantar el sistema a las 4 AM sin un ticket de soporte a otro continente. Esto es parte capital, parte el costo más difícil de construir capacidad interna que no se va con el contrato del integrador.

El punto no es que la inferencia on-premise sea demasiado cara. Frecuentemente es la arquitectura correcta, y la aritmética de latencia de la Capa 3 a menudo la fuerza. El punto es que el costo honesto a cinco años es el silicio más la ingeniería de sustento más la segunda fuente, y una propuesta que cotiza solo el silicio no costó el piso inteligente. Costó una demostración. La diferencia entre las dos es la diferencia entre un proyecto que sobrevive al término del contrato del integrador y uno que se convierte en el objeto caro de la sala de planta en el que todos dejaron, silenciosamente, de confiar.

## **PREGUNTA DE DIAGNÓSTICO**

*En un horizonte de cinco años, ¿cuál es el costo totalmente cargado de mantener este modelo coherentemente activo — el silicio, la ingeniería de sustento y la segunda fuente — y qué línea de nuestro presupuesto lo carga después de que el integrador se va?*

## 09

## LA PREGUNTA QUE SU INTEGRADOR DEBERÍA PODER RESPONDER

El instrumento más útil que un jefe de OT puede llevar a la próxima reunión de propuesta de IA es una pregunta, lo bastante específica para que una respuesta vaga sea audiblemente vaga y lo bastante estructurada para que la forma de la respuesta revele si la parte proponente pensó en el piso siquiera una vez.

■ *“¿Qué condiciones debe satisfacer nuestra operación, en forma medible, antes de que este proyecto capture el valor que ustedes proyectan? Nombren las condiciones. Nombren la medición de cada una. Nombren al dueño de cada una.”*

La respuesta ordena la sala. Si es “buenos datos y alineamiento de stakeholders”, la parte proponente no pensó en el piso, y la operación va en la correa hacia los siete-de-diez. Si es una lista de condiciones, cada una mapeada a una medición, cada una mapeada a un dueño con nombre, la parte proponente hizo el trabajo, y la conversación puede continuar productivamente hacia la secuencia.

El único trabajo del jefe de OT en ese momento es seguir preguntando hasta que la respuesta sea específica, y tratar cada retirada hacia la generalidad como un dato. La pregunta no es adversarial; es la pregunta más respetuosa disponible, porque trata a la propuesta como un compromiso comercial serio de varios años y no como un ensayo de láminas. Los integradores que hacen buen trabajo la celebran, porque les permite mostrar el trabajo. Los integradores cuyo modelo depende de firmar primero y aclarar después la resienten. Ambas reacciones son exactamente la información que el jefe de OT vino a buscar.

PISO entrega las condiciones en forma portátil. Una operación que internalizó las cuatro capas entra a la reunión con el checklist en la mano y no tiene que inventar la pregunta bajo presión. El checklist no reemplaza la expertise del integrador; ancla la conversación a la realidad de la operación en vez de al deck del proveedor, y cambia la dirección de evaluación para que la propuesta le responda al piso en vez de que el piso audicione para la propuesta.

# 10

---

## EL REBRANDING, EL ARSENAL Y EL PILOTO ETERNO

Algunas operaciones creen que ya tienen IA liderada por OT y no la tienen. Tres patrones explican la mayoría de los falsos positivos. Cada uno parece la cosa real mirado desde el otro lado de un directorio. Cada uno falla el mismo examen, y cada uno tiene un test de detección de una pregunta que el jefe de OT puede aplicar sin workshop.

**El rebranding.** Un equipo de IT corporativo se renombra "digital industrial" o "datos operacionales" y asume que ahora sostiene el mandato OT. El equipo tiene ingenieros capaces y hace trabajo útil, pero el centro de gravedad cultural nunca sale del dominio IT. Las decisiones que importan se siguen tomando en el comité de revisión de IT, con OT consultada en vez de escribiendo. *Detección: pregunte quién es dueño del runbook la noche en que el SCADA se cae a las tres de la mañana. Si la respuesta es cualquiera distinto del líder OT con la autoridad y el presupuesto correspondientes, el rebranding es maquillaje.*

**El arsenal.** Una operación compra appliances de inferencia de borde, contrata científicos de datos y firma licencias con tres proveedores de plataformas de IA. El stack tecnológico luce impecable en las fotos. No hay capa de gobernanza, no hay mandato escrito, y no hay programa documentado de integridad de datos contra el cual el arsenal opere. El arsenal ejecuta el trabajo que los proveedores especificaron y no entrega el valor que la operación proyectó, porque las condiciones para el valor nunca se describieron antes de que llegara el hardware. Esta es la tesis central del §05 hecha carne: un arsenal fuerte sobre un sustrato ausente es teatro con contrato de mantenimiento. *Detección: pregunte quién tiene el mandato permanente de hacer override a una acción autónoma en el momento en que está equivocada. Si la respuesta es difusa o es un comité, la Capa 2 está vacía y el arsenal es escenografía.*

**El piloto eterno.** Un único caso de uso aislado (mantenimiento predictivo en una flota de camiones, análisis de vibraciones en un molino) se convierte en la respuesta permanente de la operación a "¿qué están haciendo en IA?". El caso de uso puede genuinamente funcionar. No generaliza, porque las condiciones que lo sostuvieron eran específicas de su alcance angosto, y nadie construyó el sustrato que permitiría que un segundo caso de uso se parara sobre el primero. Dos años después, el piloto sigue siendo el piloto, el segundo caso de uso nunca aterrizó a escala, y el modelo mental de la organización sobre "IA en minería" se endureció alrededor de una demo. *Detección: cuente los flujos de datos entre sistemas que la arquitectura de IA soporta hoy, y luego cuéntelos a dieciocho meses atrás. Si el número no se movió, el piloto es permanente y el framework nunca se construyó.*

Ninguno de los tres se recupera agregando tecnología, que es el instinto al que cada uno va a echar mano. Cada uno se recupera solamente volviendo a las cuatro condiciones y nombrando, en voz alta, cuál falta. El trabajo es sustracción y responsabilidad, no abastecimiento.

## 11

## QUÉ VERIFICAR ANTES DE FIRMAR LA PRÓXIMA PROPUESTA

Este es el test que puede correr sobre su propia operación, esta semana, con los colegas que ya tiene. Cinco verificaciones, cada una con respuesta binaria, cada una diseñada para completarse dentro de una semana laboral por un jefe de OT con acceso a las personas correctas. Este es el test de falsación de todo lo argumentado arriba: si su operación pasa, la tesis de este paper no aplica a usted, y debería firmar con confianza. El patrón de las cinco le dice si está dentro de los siete-de-diez o fuera.

**Verificación 1 · Propiedad del sustrato.** Nombre a la persona única responsable de la integridad de datos del sustrato del que depende la propuesta: calibración física de sensores, reconciliación de datos maestros entre sistemas, marcado de brechas en las series de tiempo. Si la responsabilidad está repartida entre tres roles sin un dueño único que pueda mostrarle la cobertura de calibración hoy, la Capa 1 no está coherentemente activa y el proyecto heredará el modo de falla de su sub-capa más débil. *Pasa / falla.*

**Verificación 2 · Tiempo de respuesta.** Sobre la anomalía operacional más reciente que cruzó tres contratos de proveedores, mida el tiempo transcurrido desde que la anomalía se registró hasta que una acción correctiva se ejecutó de verdad. Si ese tiempo está consistentemente sobre los treinta minutos, la operación tiene una brecha de velocidad que ninguna arquitectura de IA puede cerrar sola, y los supuestos de latencia del proyecto son ficción hasta que la tabla de autonomía se escriba. *Pasa / falla.*

**Verificación 3 · Autoría de las propuestas.** Tome las últimas tres propuestas de IA presentadas a la operación y nombre a la parte autora de cada una. Si las tres fueron escritas por integradores o por IT corporativo, sin ningún contra-framework escrito por OT en ninguna parte del expediente, la operación tiene una brecha de identidad y la próxima firma aterrizará sobre el framework de otro. *Pasa / falla.*

**Verificación 4 · Especificidad de precondiciones.** Pídale al sponsor del proyecto activo o propuesto que nombre las condiciones que la operación debe satisfacer, en forma medible, para que la proyección de valor se sostenga. Respuesta genérica (buenos datos, alineamiento de stakeholders): el sponsor no hizo el trabajo. Respuesta específica (cobertura de calibración sobre 95 % en las sondas de pH del circuito húmedo, datos maestros reconciliados entre el MES<sup>7</sup> y el CMMS<sup>8</sup> para las clases de equipos afectadas, latencia sensor-a-setpoint acotada y medida bajo falla del enlace primario): el sponsor está comprometido. *Pasa / falla.*

**Verificación 5 · Mapa de mandatos.** Dibuje las cuatro capas PISO y asigne un dueño único con nombre a cada una en la operación tal como existe hoy. Si el jefe de OT y el gerente de planta, trabajando juntos, no pueden llenar las cuatro en una hora, el sustrato no está listo, y el próximo proyecto de IA corresponde detrás de un programa de cimientos y no junto a uno. *Pasa / falla.*

<sup>7</sup>MES — Sistema de Ejecución de Manufactura (Manufacturing Execution System). El sistema que gestiona la ejecución de producción entre el ERP corporativo y el piso operacional.

<sup>8</sup>CMMS — Sistema Computarizado de Gestión de Mantenimiento (Computerized Maintenance Management System). El sistema que gestiona la planificación de mantenimiento, órdenes de trabajo e historial de activos.

Estas cinco no son un modelo de madurez, y no promedian en un puntaje. Son pasa o falla. Una operación que falla tres o más debería tratar la próxima propuesta en consecuencia, lo que significa resecuenciarla detrás de los cimientos en vez de lanzar ambas en paralelo esperando que el sustrato alcance. No va a alcanzar solo. Nada en el piso lo ha hecho nunca.

# 12

---

## EL COSTO DE LLEGAR SIN FRAMEWORK

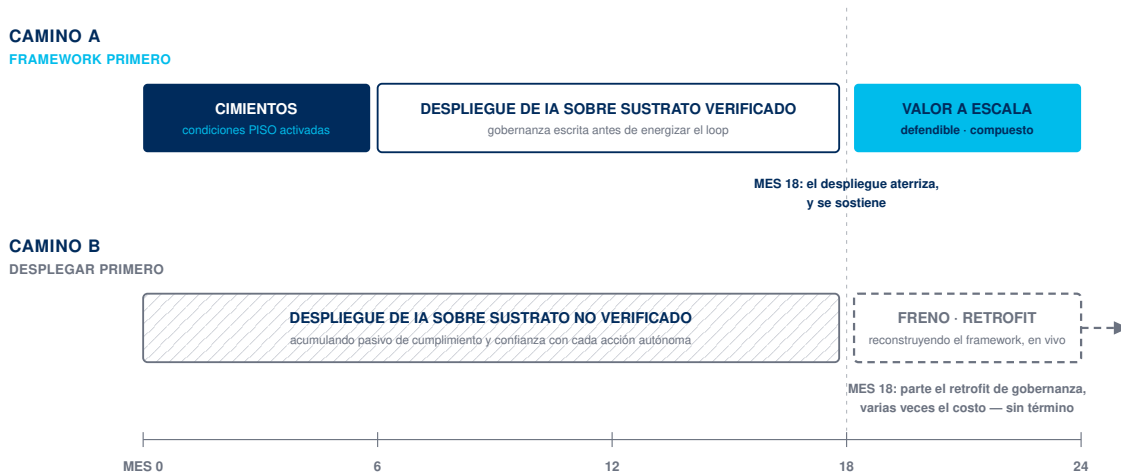
El argumento de cierre es una asimetría, y la asimetría es el caso completo. El costo de llegar a la conversación de IA con un framework es real y acotado: un programa de cimientos de seis a doce meses, un jefe de OT que dedica tiempo a escribir en vez de a revisar, una conversación de liderazgo que resecuencia el próximo piloto detrás de los cimientos y absorbe un trimestre de "avance en IA" más lento. La inversión es medible, el plazo es finito, y el trabajo es reutilizable en cada proyecto de IA que la operación enfrente durante la próxima década. El framework se construye una vez y cada propuesta se evalúa contra él para siempre.

El costo de llegar sin framework es ilimitado, y se compone. Cada proyecto firmado antes del framework se convierte en un costo hundido que el framework habría prevenido. Cada post-mortem recuenta la misma lección y no cambia nada, porque la lección vive en una lámina y no en una condición escrita con dueño. Cada sucesión de contratos de integradores deja a la operación marginalmente más dependiente de partes que no son dueñas de la superficie de falla y que no van a sentarse en la revisión de seguridad. Los siete-de-diez no son una propiedad de la tecnología. Son la línea de costo de las operaciones que nunca escribieron su propio framework, acumulando un caso de estudio a la vez.

Una operación minera LATAM en 2026 tiene dos roles disponibles. Puede ser la operación que un proveedor de IA describe en el caso de estudio del próximo año como la advertencia, o la operación que escribió el framework contra el cual se juzgan las propuestas del próximo año. El primer rol es cómodo y corto. El segundo es más difícil y paga retornos compuestos, y es el único de los dos que sigue disponible para el piso y no para las partes que lo rondan.

## LA ASIMETRÍA DE SECUENCIA — 24 MESES, DOS CAMINOS

El costo del framework es acotado y se paga una vez. El costo de saltárselo es ilimitado y se compone.



*Construye el framework una vez y evalúa cada propuesta contra él para siempre — o reconstrúyelo bajo un sistema autónomo en producción.*

**Figura 3** Dos estrategias de secuencia a lo largo de veinticuatro meses. El camino framework-primero aterriza un despliegue de IA defendible al mes dieciocho y se compone desde ahí. El camino desplegar-primero llega al mes dieciocho cargando un pasivo creciente de cumplimiento y confianza, y luego pasa el año siguiente reconstruyendo el framework que debió escribirse primero.

El piso ha sostenido la mina por treinta años. Es el activo del que depende toda la conversación de IA, y el equipo OT es la única parte de la operación que sostiene treinta años de evidencia sobre qué aguanta en ese activo y qué falla a las 4 AM. La conversación por fin está preguntando qué piensa el piso. El silencio es una respuesta, y es la que deja a la operación corriendo desde atrás. La otra respuesta es un framework.

*El piso sostuvo la mina por treinta años. La conversación que le pide pensar es la que OT nació para liderar. Llegue con el framework, o el framework llega sin usted.*

# 13

## INSIGHTS CLAVE

1 Siete de cada diez ejecutivos mineros de LATAM reconocen que sus proyectos de IA y autonomía lograron solo parcialmente los objetivos de valor con los que fueron aprobados — y el déficit se concentra debajo del modelo, en el piso. Esa es la asimetría completa: llegar con framework cuesta seis a doce meses de cimientos; llegar sin él cuesta ilimitado y se compone, un proyecto firmado-antes-de-tiempo a la vez.

2 Las barreras que los propios ejecutivos nombran son organizacionales, no técnicas: la resistencia al cambio y el talento quedan muy por delante de la confiabilidad tecnológica. Las propuestas se escriben sobre la barrera técnica. Los proyectos mueren en las organizacionales.

3 La convergencia es un evento de organigrama; la falla es un evento de arquitectura. Una mina puede estar completamente convergida y aun así sumarse a los siete-de-diez. La pregunta no es si IT y OT se encuentran al medio — es quién llega a ese encuentro con el framework en la mano.

4 PISO nombra cuatro condiciones codependientes — integridad de datos, gobernanza y mandato, conectividad soberana, learning loop. Ninguna capa entrega valor en aislamiento: la Capa 4 sin la Capa 1 aprende mentiras; la Capa 3 sin la Capa 2 actúa sin autoridad; la Capa 2 sin la Capa 1 gobierna ruido.

5 "Coherentemente activa" es el test, y son tres cosas a la vez: operativa en el día a día, con un dueño único con nombre y autoridad, y observable hoy sin agendar un workshop. Un programa que existe como lámina falla las tres.

6 El costo honesto a cinco años del piso inteligente es el silicio más la ingeniería de sustento más la segunda fuente. Una propuesta que cotiza solo el silicio no costó un piso inteligente. Costó una demostración.

7 Una pregunta ordena cada reunión de propuesta: "¿Qué condiciones debe satisfacer nuestra operación, en forma medible, antes de que este proyecto capture el valor que ustedes proyectan — nombren cada condición, su medición y su dueño?" Una respuesta genérica es el dato.

## 14

## FUENTES

Los claims públicos de este paper, con sus fuentes. El incidente del gateway del §02 y la historia del ejecutivo del §03 son composites anonimizados contruidos desde engagements de recursos naturales en LATAM; ilustran el diagnóstico, no a un cliente con nombre. La cifra de los "siete-de-diez" se origina en investigación propia de NTT DATA y está marcada como tal donde se usa.

- NTT DATA × MIT Technology Review, *Autonomía en el negocio minero: más allá de la tecnología, el desafío del talento y la cultura*, 2025 — encuesta a ejecutivos mineros de Chile, Brasil, Perú y México; el hallazgo del 72 % de logro parcial y el ranking de barreras (resistencia al cambio 27,5 %, talento especializado 14,5 %, confiabilidad tecnológica 11,6 %). Cobertura: Mexico Business News (dic 2025) · TI Inside (dic 2025).
- Estudio independiente cross-industria a ejecutivos, 2025 (>1.250 empresas) — cifras de corroboración sobre captura de valor de IA (el patrón ~60 % / ~5 % citado en §04). Referencia específica disponible a pedido.
- International Mining, *BHP Copper Advanced Services opens new modernised ops centre in Santiago*, 15 de octubre de 2024 — inversión de US\$48,3 millones, 5,4 terabytes de datos operacionales al día, enlace dedicado Antofagasta–Santiago, sirviendo a Spence y Escondida — International Mining.
- BHP, *2024 Chilean copper site tour*, 18 de noviembre de 2024 — Escondida: ruta hacia >500 kt de cobre incremental hacia el FY31 vía optimización del plan minero e iniciativas de concentradora, y al BHP Operating System se le acreditan ~US\$1.000 millones de ahorro acumulado en Escondida desde su despliegue — BHP (PDF). Producción FY2025 (Escondida 1.305 kt, +16 %, récord de tratamiento de concentradora) — SEC EDGAR.
- NTT DATA, *Codelco and NTT DATA sign "Future of Mining" strategic alliance*, 20 de noviembre de 2025 — anuncio first-party; el alcance abarca conectividad avanzada, IA generativa, robótica, operaciones autónomas y gemelos digitales — NTT DATA Newsroom.
- Global Mining Guidelines Group, *Guideline for Implementation of Autonomous Systems in Mining*, Versión 2, agosto 2024 — el playbook de referencia de la industria para planificar, probar y desplegar sistemas autónomos — GMG (PDF).
- IIoT World, *Secure OT Data Flows Before Scaling AI*, 28 de mayo de 2026 — las 139 conexiones de datos OT previamente desconocidas halladas en un mapeo de flujos pre-IA; los datos del historian como infraestructura crítica — IIoT World.
- NTT DATA BizTalks, *IT/OT Convergence in Mining Operations*, abril 2026 — whitepaper hermano de esta serie; la pregunta de convergencia que este paper deliberadamente re-enmarca — BizTalks.

**NTT DATA · Natural Resources Practice · 2026** · biztalksnttdata.com · Pillar 01 · The Floor

Para más sobre este tema, contacta a: **Jaime Rebolledo**, Director Value Proposition Mining, NTT DATA · jaime.rebolledocampos@nttdata.com.