

TRANSPORTE · ENERGÍA · GEMELOS DIGITALES OPERACIONALES

Más Allá de la Productividad

El Gemelo Digital que Co-Optimiza Energía y Producción en el Transporte CAEX de Altura

Por qué los sistemas que despachan tu flota optimizan lo que no toca — y qué cambia cuando la energía entra a la decisión, en tiempo real, sin frenar la producción

AUDIENCIA

Operaciones, Energía y Confiabilidad

FOCO

Energía + producción en el transporte

REGIÓN

LATAM · Cobre de altura

Contenido

01	Resumen Ejecutivo	3
02	La Energía que el Dispatch No Ve	4
03	Por Qué la Altura Cambia la Aritmética	5
04	La Rampa: Donde Producción y Energía Pelean	5
05	El Gemelo que Decide, No el que Visualiza	6
06	La Evidencia, en Simulación	7
07	La Honestidad del Modelo: Dónde la Ganancia Cede	8
08	El Contexto Ya Llegó a los Andes	8
09	De la Simulación a la Faena: Qué Exigir	10
10	Ideas Clave	11
11	Fuentes	12

01

RESUMEN EJECUTIVO

En una mina de rajo, el transporte de mineral es el mayor consumidor de energía del sitio — y la decisión que más mueve ese consumo la toma un sistema que no mira la energía. Esa es la oportunidad, y es la tesis de este documento: un gemelo digital operacional que **co-optimiza producción y energía en la misma decisión, en tiempo real**, recortó en simulación **6,4 % la energía por tonelada cediendo apenas 1,8 % de tiempo de ciclo**. No es energía o producción. Es energía y producción.

La distinción que importa para un ejecutivo es de tipo, no de grado. El gemelo digital del que se habla en casi toda la industria es uno que *muestra*: una réplica que visualiza el estado de la flota. El que proponemos *decide*: cierra el lazo y entrega recomendaciones de operación al sistema de despacho. Esa diferencia — observar versus actuar — es la que separa un proyecto de tablero de uno de optimización, y es donde está el valor.

En nuestra experiencia acompañando operaciones de altura, lo que más sorprende no es la magnitud del ahorro energético: es que nadie lo estuviera midiendo dentro de la decisión de despacho. La energía se reporta, se audita, entra al directorio — pero no retroalimenta cómo sube cada camión cada ciclo. Es información, no es control.

Seremos directos sobre el estado de la evidencia, porque la honestidad es parte del argumento: estos resultados son de **simulación física calibrada, no de una faena desplegada**. Lo decimos así, sin adornos, porque para un operador que ha visto fracasar proyectos de “optimización”, saber dónde *no* gana un modelo es lo que genera confianza. Las páginas que siguen explican dónde está la energía, por qué la altura agrava el problema, qué hace exactamente este gemelo digital, qué mostró la simulación — incluidos sus límites — y, sobre todo, qué debería exigir un ejecutivo antes de firmar el próximo proyecto de “optimización de flota”.

■ **IDEA CLAVE** — El transporte es la mayor palanca energética de la mina, y la decisión que más la mueve la toma un sistema que no la ve. Cerrar esa brecha no es un tablero más: es meter la energía adentro de la decisión, ciclo a ciclo.

02

LA ENERGÍA QUE EL DISPATCH NO VE

Cuando una operación habla de su consumo energético, el transporte debería ser la primera línea del presupuesto, no una nota al pie. En la minería de cobre chilena a rajo abierto, **la carga y el transporte consumen cerca del 75 % de la energía del proceso de extracción**^[^energía]. A escala global, los camiones de extracción concentran más del 30 % de la energía de una mina de rajo y más de la mitad de sus emisiones directas — el Scope 1¹.

La asimetría es el punto. La energía es la partida más grande y, a la vez, la que menos entra a la decisión minuto a minuto. Esto no ocurre por descuido, sino por cómo está organizada la operación: los sistemas que despachan la flota — los Fleet Management Systems (FMS²) y los Autonomous Haulage Systems (AHS³) — nacieron para optimizar productividad, y la energía se ataca en otro carril, como un proyecto de electrificación o de tren de potencia (el sistema motor-transmisión del camión). Son, en la práctica, **dos equipos que no se hablan**: el que decide la velocidad de cada ciclo no tiene la energía en su objetivo, y el que gestiona la energía no toca el despacho en tiempo real.

■ **IDEA CLAVE** — Optimizar el transporte solo por productividad deja fuera de la decisión la mayor palanca energética de la mina.

Ese arreglo produce un óptimo local con un costo oculto. Un despacho que persigue solo el menor tiempo de ciclo, con perfiles de velocidad fijos por segmento y sin retroalimentación de energía — la configuración típica de la industria — toma decisiones óptimas para el cronómetro y caras para el medidor de energía. Y, como veremos, hay un lugar donde esa diferencia deja de ser lineal.

¹Emisiones directas de gases de efecto invernadero de fuentes propias de la operación — en minería, sobre todo el diésel de los equipos móviles —, según el protocolo GHG.

²Fleet Management System — el sistema que asigna y despacha la flota de transporte en tiempo real, optimizando asignación camión-pala, colas y tiempos de ciclo.

³Autonomous Haulage System — el sistema que opera camiones de transporte de forma autónoma, con su propia envolvente de velocidad y restricciones de seguridad.

03

POR QUÉ LA ALTURA CAMBIA LA ARITMÉTICA

Todo lo anterior es cierto a nivel del mar. En las faenas de cobre del norte de Chile — Tarapacá y Antofagasta, entre los 3.000 y los 4.600 metros — se agrava.

Con menos oxígeno, los motores diésel entregan menos potencia y trabajan más caliente. Los camiones ultra-clase modernos vienen con paquetes de gran altitud que les permiten operar en la cordillera sin pérdida formal de potencia, pero “sin pérdida formal” no es “sin costo físico”: el aire enrarecido eleva las temperaturas de escape y el estrés térmico sobre el sistema de tracción, incluso en equipos aptos para la altura.⁴ La altura no cambia la dirección del problema energético; cambia su pendiente. Cada decisión de velocidad y de carga en una rampa cuesta más, y el margen entre operar eficiente y castigar el activo es más angosto.

Por eso el cobre de altura es el caso de borde perfecto para repensar cómo se despacha la energía. No es un laboratorio abstracto: es donde la industria está construyendo, hoy, su próxima generación de infraestructura de transporte.

04

LA RAMPA: DONDE PRODUCCIÓN Y ENERGÍA PELEAN

Tomemos el escenario que evaluó el modelo, representativo de una operación real de cobre de altura: camiones de 320 a 360 toneladas de carga subiendo un tramo de 2,1 kilómetros al 9-10 % de pendiente, con cobertura de trolley⁵ cercana al 65 %, a una elevación de entre 2.800 y 3.200 metros.

En un tramo plano, pedir un poco más de velocidad cuesta un poco más de energía: la relación es suave y el cronómetro y el medidor casi no discuten. En una rampa de alta pendiente, esa relación se quiebra. La energía pasa a depender de forma no-lineal de tres cosas que se combinan — la carga del camión, la pendiente del tramo y las condiciones ambientales. Subir un poco más rápido un camión casi lleno por una rampa empinada no cuesta “un poco más” de energía: cuesta mucho más, y empuja la tracción hacia su zona de estrés térmico.

⁴Regla técnica de la industria: los motores diésel de aspiración natural pierden del orden de 3,5 % de potencia por cada 305 m de altitud. Los paquetes de gran altitud (HAA) de los camiones ultra-clase compensan la potencia, pero la menor densidad de aire eleva igualmente las temperaturas de escape y el estrés térmico.

⁵Trolley assist — electrificación de un tramo de rampa mediante catenaria y pantógrafo, que permite al camión subir con energía eléctrica de la red en vez de diésel.

Ahí el despacho por productividad falla en silencio. Optimizando el tiempo de ciclo, elige la velocidad que minimiza los segundos — y en la rampa esa elección **sobre-prioriza el throughput justo donde la penalidad energética es más pronunciada**. No es un error de configuración: es la consecuencia lógica de optimizar una sola variable en el punto donde la otra se dispara. El sistema hace exactamente lo que se le pidió; lo que se le pidió está incompleto.

■ **IDEA CLAVE** — En las rampas la energía es no-lineal en carga, pendiente y ambiente. El despacho convencional paga ahí penalidades invisibles, no por error sino por optimizar una sola variable donde la otra se dispara.

Un operador con experiencia lo intuye y a veces lo corrige a mano. Pero esa corrección no escala a una flota autónoma de decenas de camiones operando sin pausa, y no está en el objetivo del sistema que decide.

05

EL GEMELO QUE DECIDE, NO EL QUE VISUALIZA

Aquí está la distinción que ordena todo el resto. “Gemelo digital” se usa para casi cualquier cosa, casi siempre para describir una pantalla: una réplica que muestra el estado de un activo. Ese no es el gemelo de este trabajo.

■ **IDEA CLAVE** — El gemelo que importa no es el que muestra. Es el que decide.

El gemelo que proponemos cierra el lazo: lee la operación, calcula la mejor jugada y la entrega al sistema de despacho como recomendación de control. En concreto, hace tres cosas. Primero, entiende la física de por qué cuesta lo que cuesta subir una carga por una pendiente a 3.000 metros — no estadística de caja negra, sino un modelo de energía basado en las fuerzas reales del problema.⁶ Segundo, fusiona en tiempo real tres familias de datos que hoy viven separadas: la telemetría del camión (carga, velocidad, potencia), la geometría del camino (pendiente, curvatura, estado de la carpeta) y el estado de la infraestructura eléctrica (disponibilidad de trolley, restricciones de potencia). Tercero, sobre esa base decide: modula la velocidad dentro de un rango acotado por la seguridad, ajusta cuándo conviene engancharse al trolley, y rechaza un ciclo de carga cuando detecta una sobrecarga que

⁶Técnicamente, un modelo de esfuerzo tractivo que suma la resistencia a la rodadura, la resistencia por pendiente y la densidad de aire corregida por altitud, más un estimador dinámico de la carga térmica de la tracción.

dispararía los umbrales térmicos de la tracción. La decisión se rehace continuamente, en ventanas de 30 segundos.⁷

La diferencia importa para el comprador. Un gemelo que visualiza necesita pantallas y gente que las mire. Un gemelo que decide necesita integración con los sistemas de control y una envolvente de seguridad validada. Son proyectos distintos, con riesgos distintos, y confundirlos es la forma más común de comprar un tablero caro creyendo que se compró una optimización.

06

LA EVIDENCIA, EN SIMULACIÓN

Una aclaración de entrada, porque sostiene la credibilidad de todo lo demás: los resultados que siguen vienen de una **simulación física calibrada** con datos operacionales publicados para camiones ultra-clase en cobre de altura — no de una faena desplegada. El modelo muestra esto; llevarlo a terreno es el paso siguiente, y la Sección 09 dice qué exige.

Sobre múltiples ciclos de transporte, variando carga, pendiente y ambiente, comparamos el gemelo digital contra el despacho FMS por productividad. Esta es la tabla.

Tabla 1 Desempeño comparado entre el despacho FMS por productividad y el gemelo digital de lazo cerrado, sobre múltiples ciclos de transporte simulados (rampa de 2,1 km al 9-10 %, 2.800-3.200 m).

Métrica	FMS (línea base)	Gemelo digital	Variación
Energía (kWh/t) ⁸	100 %	93,6 %	-6,4 %
Tiempo de ciclo	100 %	101,8 %	+1,8 %
Variabilidad del tiempo de ciclo	100 %	95,3 %	-4,7 %
Eventos de estrés térmico	100 %	92,4 %	-7,6 %

El titular es la energía: **6,4 % menos por tonelada**, con picos de hasta **9,1 % en las rampas sobre 9 %** — donde más duele. El costo es modesto y está bajo control: el tiempo de ciclo promedio sube 1,8 %. Y aquí lo interesante: la *variabilidad del tiempo de ciclo* baja casi 5 %. Menos variabilidad es un transporte más predecible, más fácil de sincronizar con la pala y el chancado. El gemelo no desestabiliza la producción; la estabiliza.

Hay un tercer efecto, sobre el activo: los eventos de estrés térmico de la tracción caen 7,6 %.⁹ Optimizar la energía, en este modelo, también cuida el motor — un beneficio que no aparece en el medidor de energía pero sí en el presupuesto de confiabilidad.

⁷Es un control predictivo basado en modelo (MPC): optimiza las acciones sobre un horizonte futuro corto — aquí, 30 segundos — y vuelve a resolver continuamente con cada dato nuevo, dentro de la envolvente de velocidad del AHS (modulación acotada a ± 10 %).

⁸Kilowatt-hora por tonelada — energía consumida por unidad de material transportado; la métrica de eficiencia energética del transporte.

⁹Evento de estrés térmico: la tracción operando por encima del 85 % de su capacidad nominal sostenida por más de 90 segundos.

IDEA CLAVE — En simulación: 6,4 % menos de energía por tonelada cediendo 1,8 % de tiempo de ciclo, con la variabilidad bajando casi 5 % y los eventos térmicos 7,6 %. La energía y la producción dejaron de competir.

07

LA HONESTIDAD DEL MODELO: DÓNDE LA GANANCIA CEDE

Un resultado que solo reporta sus ganancias es marketing. Buena parte del valor de este trabajo está en que reporta dónde *no* gana.

Bajo carga extrema — cargas sobre el 95 % de la capacidad en los tramos de máxima pendiente — las ganancias energéticas se reducen. La razón es deliberada: en ese régimen el modelo prioriza proteger la tracción por sobre ahorrar energía. Cuando cuidar el motor y ahorrar energía entran en conflicto, elige el motor. El resultado es una penalidad de tiempo de ciclo mayor al promedio y un ahorro menor.

Eso no es una falla: es el criterio funcionando. Un activo dañado en una faena de altura — donde un cambio de componente mayor deja un camión de cientos de toneladas detenido por días — sale mucho más caro que un ciclo lento. La jerarquía está bien puesta: seguridad y activo primero, energía después, nunca a costa de los dos primeros.

Para un comprador, esa es la pregunta de diligencia que separa a un optimizador serio de uno ingenuo: *¿qué hace tu sistema cuando energía, producción y salud de activos entran en conflicto?* El que no responde eso con una jerarquía explícita no está listo para tocar el despacho de una flota real.

08

EL CONTEXTO YA LLEGÓ A LOS ANDES

Nada de esto es teórico para el cobre chileno. La infraestructura sobre la que opera este gemelo digital — la electrificación del transporte — ya está en faena, y la presión que lo vuelve urgente ya tiene fecha en el calendario regulatorio.

Lo que ya está operando. En 2025, Collahuasi puso en marcha en su rajo Rosario el primer trolley assist de Chile y Sudamérica, sobre los 4.000 metros, alimentado con electricidad renovable: en el tramo electrificado el diésel cae cerca de 98 % y la velocidad sube de 11 a 25

km/h.¹⁰ BHP presentó el estudio ambiental para electrificar con trolley el rajo de Escondida Norte — en la Región de Antofagasta — con una meta de abatir, entre las operaciones de Escondida y Spence, del orden de 350 millones de litros de diésel al año.¹¹ Y Codelco anunció que probará en Radomiro Tomic, desde 2026, el sistema de carga dinámica de Caterpillar sobre camiones en movimiento.¹² Tres de las mayores operaciones del país, moviendo la misma pieza.

Lo que lo vuelve obligación, no buena práctica. La Ley 21.305 de Eficiencia Energética obliga a los grandes consumidores — la minería entre ellos — a operar un Sistema de Gestión de Energía y a reportar su consumo e intensidad energética al Ministerio de Energía, bajo fiscalización de la SEC.¹³ En paralelo, la Norma de Carácter General 461 de la CMF exige a las empresas listadas — varias mineras incluidas — divulgar sus emisiones Scope 1 y 2 en la memoria anual, alineadas con TCFD, con el estándar pleno entrando en 2026.¹⁴ La energía del transporte dejó de ser una métrica interna: es un dato que se reporta, se audita y se compara.

IDEA CLAVE — Para Antofagasta Minerals, el Scope 2 ya está resuelto: contratos 100 % renovables desde 2022. Lo que queda en pie es el Scope 1: 1,23 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2024, dominadas por el diésel del transporte. Esa es la frontera, y la meta de Antofagasta Minerals de bajar esas emisiones a la mitad para 2035 tiene que morder ahí.

El caso de Antofagasta Minerals lo deja nítido: con la electricidad ya descarbonizada, el diésel del transporte es lo que separa a la compañía de su meta de reducir a la mitad sus emisiones Scope 1 y 2 hacia 2035.¹⁵ Cada punto de eficiencia energética en el transporte cuenta dos veces: en el costo operacional y en el reporte de emisiones que ahora es obligatorio.

Una objeción que conviene neutralizar de entrada. Si lees esto, lo más probable es que tu flota ya corra sobre un FMS — Komatsu DISPATCH, Caterpillar MineStar o equivalente — elegido hace años. El gemelo digital del que hablamos no reemplaza esa decisión: opera *sobre* ella. Toma la telemetría que tu sistema ya produce y le devuelve recomendaciones

¹⁰La elevación reportada para Collahuasi varía entre fuentes (≈4.000-4.600 m según el sector del yacimiento); el rajo Rosario, donde opera el trolley, se ubica en el extremo alto de ese rango.

¹¹Los ~350 millones de litros/año de diésel y la flota de ~200 camiones (entre Escondida y Spence) provienen del comunicado de prensa de BHP que anuncia el proyecto de trolley; el estudio de impacto ambiental (DIA) presentado ante el SEIA considera una inversión del orden de US\$250 millones. (La flota actual de Escondida se reporta como 160+ camiones; la cifra de ~200 abarca ambas operaciones.)

¹²Piloto de un año con camiones Caterpillar 798 sobre un tramo electrificado en movimiento; reducción proyectada de 60-70 % por camión. Es una prueba de validación, no un compromiso de electrificación de flota.

¹³La Ley 21.305 (2021) obliga a los Consumidores con Capacidad de Gestión de Energía — sobre 50 teracalorías al año, umbral que las grandes faenas superan — a implementar un Sistema de Gestión de Energía que cubra al menos el 80 % de su consumo, designar un gestor de energía y declarar anualmente.

¹⁴La NCG 461 (2021) integra la divulgación ESG en la memoria anual de los emisores inscritos en la CMF, alineada con TCFD y SASB; las emisiones Scope 1 y 2 son obligatorias y el estándar pleno (alineado con ISSB) aplica a partir del ejercicio fiscal 2026, cuyos reportes se publican en 2027. La norma reporta a nivel corporativo consolidado, no por activo.

¹⁵Antofagasta Minerals: neutralidad de carbono a 2050, meta intermedia de -50 % en Scope 1 y 2 a 2035 (base 2020); contratos de electricidad 100 % renovable desde abril de 2022 (Scope 2), con el Scope 1 — 1,23 Mt CO₂e en 2024 — dominado por el diésel.

que entran a su lógica de despacho. La pregunta no es “¿cambio mi FMS?”, sino “¿le agrego la capa que hoy no tiene?”.

09

DE LA SIMULACIÓN A LA FAENA: QUÉ EXIGIR

El trabajo es explícito en que llevar esto a operación exige tres cosas. Las enumeramos, pero la enumeración es lo fácil; lo que diferencia a quien ya lo ha hecho de quien genera contenido es saber dónde está la fricción real.

Integración con tu FMS/AHS — y aquí está el obstáculo más subestimado. No es técnico. Es conseguir que el equipo del proveedor de tu FMS abra la API de despacho lo suficiente para recibir recomendaciones externas. Un gemelo que decide no sirve de nada si la decisión no tiene por dónde entrar al sistema que despacha; esa negociación — comercial y contractual, más que de ingeniería — suele ser el camino crítico del proyecto, y casi nunca aparece en la propuesta.

Validación de seguridad, como alcance y no como permiso posterior. Cualquier recomendación que module la velocidad de un camión autónomo de cientos de toneladas cruza un umbral de seguridad. La envolvente del AHS y las restricciones operacionales no se negocian; el optimizador trabaja *dentro* de ellas. Eso se diseña y se valida desde el día uno, no se tramita al final.

Calibración contra tu faena, no contra un catálogo. El modelo es físico, pero sus parámetros son locales: la resistencia de *tus* caminos, los perfiles de *tus* rampas, el comportamiento térmico de *tu* flota a *tu* altitud. Y la calibración deriva — un cambio en la carpeta de rodado o en el plan minero la corre. El gemelo que funciona es el que se mantiene calibrado, no el que se entrega calibrado una vez.

IDEA CLAVE — El obstáculo más subestimado no es técnico: es conseguir que el proveedor de tu FMS abra la API de despacho lo suficiente para recibir recomendaciones externas. Esa negociación, no el modelo, suele ser el camino crítico.

Por eso el ángulo de NTT DATA en esto no es el *qué* — el qué lo define el modelo, y la industria lo va a converger. Es el *cómo*: cómo se integra a la realidad de sistemas de una faena, cómo se valida sin comprometer la seguridad, cómo se mantiene calibrado, y cómo se gobierna la jerarquía de objetivos cuando energía, producción y activo compiten. Esa es ingeniería de implementación, y es donde un piloto prometedor se convierte — o no — en una operación que se puede defender.

El transporte es la energía más grande de la mina, y la decisión que más la mueve la toma un sistema que no la mira. El gemelo digital que importa no es el que muestra el problema: es el que decide, con la energía adentro, dentro de la envolvente de seguridad, y protegiendo el activo cuando todo lo demás compite. En simulación ya rinde. Llevarlo a la rampa es ingeniería de implementación, y es el trabajo.

10

IDEAS CLAVE

1 El transporte es la mayor palanca energética de la mina, y la decisión que más la mueve — el perfil de velocidad ciclo a ciclo — la toma un sistema que no ve la energía. Cerrar esa brecha no es un tablero más: es meter la energía adentro de la decisión.

2 El gemelo digital que importa no es el que muestra. Es el que decide en lazo cerrado y le devuelve la jugada al despacho.

3 En las rampas la energía es no-lineal en carga, pendiente y ambiente. El despacho por productividad sobre-prioriza el throughput justo donde la penalidad energética se dispara — no por error, sino por optimizar una sola variable.

4 En simulación, el gemelo logró 6,4 % menos de energía por tonelada cediendo apenas 1,8 % de tiempo de ciclo, y bajó la variabilidad del ciclo casi 5 %. La energía y la producción dejaron de competir.

5 La honestidad del modelo es parte del valor: bajo carga extrema elige proteger la tracción antes que ahorrar energía. Estos resultados todavía no están validados en faena — eso es lo que viene, y es la conversación que un proyecto serio tiene desde el día uno.

6 Probablemente ya corres un FMS elegido hace años. El gemelo no lo reemplaza: opera sobre él. Y el obstáculo más subestimado para conectarlo no es técnico — es abrir la API de despacho del proveedor.

11

FUENTES

Las cifras de desempeño del gemelo digital — energía, tiempo de ciclo, variabilidad y eventos térmicos — provienen del trabajo de simulación de los autores y se reportan como resultados de simulación física calibrada, no de operación en terreno. Las cifras de contexto se respaldan con las fuentes públicas siguientes.

- Trabajo fuente de los autores: *Closed-Loop Energy-Aware Digital Twin for Trolley-Assisted CAEX Haulage / Beyond Productivity: Energy-Optimized Digital Twins for Surface Mine Truck Haulage at High Altitude* — Priscila Alves y Víctor Baeza, NTT DATA Chile, 2026.
- Carga y transporte ≈ 75 % de la energía del proceso de extracción a rajo abierto en Chile — Energía en Minería, Ministerio de Energía — energiaenmineria.cl.
- Participación del transporte en energía y emisiones de rajo (>30 % energía, >50 % Scope 1) — *Scientific Reports* (2025) — PMC12216276.
- Ley 21.305 de Eficiencia Energética (2021): obligación de Sistema de Gestión de Energía y reporte para grandes consumidores (minería incluida), fiscalizada por la SEC — Ministerio de Energía — energia.gob.cl/panel/ley-21305.
- CMF, Norma de Carácter General 461 (2021): divulgación obligatoria de Scope 1 y 2 alineada con TCFD en la memoria anual; estándar pleno desde 2026 — cmfchile.cl.
- Antofagasta Minerals: meta de -50 % Scope 1 y 2 a 2035 (base 2020), contratos 100 % renovables desde 2022 — antofagasta.co.uk/sustainability/climate-change; Scope 1 2024 ≈ 1,23 Mt CO₂e según los KPI del Annual Report 2024 — antofagasta.co.uk/investors/annual-report-2024/kpis.
- Collahuasi: primer trolley assist de Sudamérica en el rajo Rosario, sobre los 4.000 m, -98 % diésel en el tramo, velocidad 11→25 km/h — *International Mining*, julio 2025 — im-mining.com.
- BHP/Escondida (Región de Antofagasta): estudio de impacto ambiental presentado para trolley assist, inversión ~US\$250 millones — *International Mining*, julio 2024 — im-mining.com. Los ~350 millones de litros/año de diésel abatidos y la flota de ~200 camiones (entre Escondida y Spence) provienen del comunicado de prensa de la propia BHP — bhp.com.
- Codelco: piloto de Dynamic Energy Transfer de Caterpillar (carga dinámica) en Radomiro Tomic, inicio 2026 — *International Mining*, octubre 2025 — im-mining.com.
- Técnicas de machine learning para la optimización energética en minería (≈15 % de energía en despliegues de gemelos digitales; hasta 20 % con control de ventilación por aprendizaje por refuerzo) — *Frontiers in Energy Research* (2025) — frontiersin.org.
- Reducciones de Scope 1 en cobre aún rezagadas; 87 % del cobre proviene de rajo abierto — S&P Global Market Intelligence (2024) — spglobal.com.

NTT DATA · Natural Resources Practice · 2026 · biztalksnttdata.com

Para más sobre este tema, contacta a: **Priscila Alves**, Natural Resource Manager, NTT DATA · priscila.alvescastromartins@emeal.nttdata.com.