

Caso de Discusión N° 5

Minería de Datos en la Mina Bagdad

Abril 2024

Este caso describe cómo una operación madura desafía el statu quo, buscando una mejor forma de hacer las cosas basada en datos.



Introducción

Una de las primeras noticias acerca de un nuevo programa en la mina Bagdad provino del propio CEO de Freeport-McMoRan Inc., Richard Adkerson. En abril de 2019, en la conferencia de resultados del primer trimestre de ese año, el Sr. Adkerson dijo: “Estamos progresando en nuestra gestión de productividad y control de costos utilizando *advanced analytics* en nuestra mina Bagdad.” Indicó que se trata de un plan piloto para Freeport, que “usa la capacidad que entrega la gestión de datos para medir cosas y responder muy rápidamente.” Confidenció que “la gente no relaciona intuitivamente esto en un negocio como el nuestro.” Informó que han incorporado expertos(as) externos(as) para trabajar con los equipos propios, indicando que “estamos muy alentados por lo que está pasando en Bagdad ahora, y la próxima parada será Morenci. En todas partes, usaremos *big data analytics* para mejorar el negocio, bajar nuestros costos y aumentar la productividad.”¹



La puesta en escena parecía hecha por el equipo de relaciones públicas más que por la unidad de relaciones con inversionistas. Allí estaba el líder del mayor productor de cobre del mundo listado en la bolsa, una empresa que en 2019 vendió 3.292 millones de libras de cobre, destacando una de las nueve minas que opera en Estados Unidos. Pero no cualquier mina; el Sr. Adkerson estaba hablando de minería de datos en la mina Bagdad, cuyos inicios datan de 1882.

Efectivamente, la minería, con sus camiones y palas gigantes, no trae a la mente la imagen de la nueva economía basada en plataformas de datos, donde empresas hoteleras no tienen hoteles y empresas de transporte no poseen autos. Pero esa era la imagen que Freeport quería dejar en los(as) inversionistas: el futuro había llegado a la antigua Bagdad y su éxito se traspasaría a cada una de las otras operaciones para convertir a Freeport en un competidor formidable, creando gran valor para el accionista.

¹ Citado por Chris Hinde. “Mining’s Artificial Intelligence”. [Mining Beacon](#). 9 octubre 2019. Morenci es otra mina de Freeport en Arizona.



Una imagen de futuro para ayudar a olvidar la adquisición de Plains Exploration y McMoRan Exploration, de petróleo y gas, por US\$19 mil millones en 2013, hecha justo antes que los precios del petróleo cayeran a casi la mitad. Una adquisición que obligó a Freeport, para bajar su nivel de deuda, a vender su participación de 56% en la mina de cobre y cobalto Tenke Fungurume en la República Democrática del Congo a China Molybdenum en US\$2,69 mil millones, a desprenderse de una parte de su mina Morenci en Estados Unidos y a levantar capital cuando la acción comandaba bajos precios.²

La Mina Bagdad

Bagdad está ubicada a unas 100 millas al noroeste de Phoenix en el estado de Arizona en Estados Unidos. Su operación consta de una planta concentradora de 75.000 toneladas métricas por día que produce concentrado de cobre y molibdeno; una planta SX/EW con capacidad para producir 32 millones de libras anuales de cátodos de cobre a partir de soluciones generadas por la lixiviación de acopios de mineral de baja ley; y una planta de *pressure-leach* para procesar concentrados de molibdeno.



² CESCO, Spencer Stuart. Mining for Value: Industry Leaders Disclose Lessons Learned from the Supercycle. 2018.

Las primeras prospecciones se remontan a 1882. Su primer molino procesó mineral de la mina subterránea a partir de 1928, iniciando la transición a rajo abierto en 1945.

Tuvo una inversión de US\$240 millones en 1973 en camiones, palas, en la concentradora y en 400 casas para la comunidad de Bagdad, que fue originalmente construida como campamento minero o "company town".³



Freeport-McMoRan Inc.

En 2019, Freeport-McMoRan tuvo ingresos por US\$14.402 millones, una utilidad operacional de US\$1.091 millones y una pérdida final de US\$239 millones. Sus activos totalizaron US\$40.809 millones; mantiene una deuda de US\$9.826 millones; y su caja alcanza a US\$2.020 millones.

Freeport-McMoRan: Información Financiera y Operacional					
(US\$ Millones)	2019	2018	2017	2016	2015
Ingresos	14.402	18.628	16.403	14.830	14.607
Utilidad Operacional	1.091	4.754	3.690	(2.729)	(13.437)
Utilidad Neta	(239)	2.602	1.817	(4.154)	(12.236)
Caja y Equivalentes	2.020	4.217	4.526	4.262	193
Prop., Plantas & Equipos y Des. Mina	29.584	28.010	22.994	23.348	24.245
Prop. Netas de Petróleo y Gas	--	--	--	74	7.093
Activos a la Venta	--	--	--	5	4.862
Total Activos	40.809	42.216	37.302	37.317	46.577
Deuda Total	9.826	11.141	13.229	16.126	20.428
Producción Cobre (Millones Libras)	3.247	3.813	3.737	4.222	3.568
Venta Cobre (Millones Libras)	3.292	3.811	3.700	4.227	3.603
Precio Realizado Cobre (US\$/Libra)	2,73	2,91	2,93	2,28	2,42
Producción Oro (Miles de Onzas)	882	2.439	1.577	1.088	1.257
Producción Moly (Millones de Libras)	90	95	92	80	92

Fuente: Freeport-McMoRan Inc. *Building on Strength: 2019 Annual Report*. Marzo 2020.

³ Website de Freeport-McMoRan Inc.

El Programa Piloto en la Mina Bagdad

Según la Memoria Anual 2019 de Freeport: “El programa piloto iniciado en la mina Bagdad en el noroeste de Arizona a fines de 2018 ha sido exitoso en utilizar *data science*, *machine learning* y equipos funcionales integrados para resolver cuellos de botella, entregar beneficios en reducción de costos y mejorar el desempeño global. El programa está siendo implementado ahora en todas las operaciones de América del Norte y América del Sur.”⁴

El programa piloto contó con apoyo al más alto nivel. En una entrevista al *Financial Times* publicada el 4 de noviembre de 2019, el CEO de Freeport indicó que la compañía ha estado probando un modelo de inteligencia artificial en la mina Bagdad y que ahora lo implementará en sus operaciones en las Américas. Dijo el Sr. Adkerson: “Tenemos la meta aspiracional de agregar 200 millones de libras de cobre a partir de estas iniciativas con muy baja inversión de capital.” Dicha inversión no superaría los US\$200 millones. La entrevista agrega que el aumento en producción anual, equivalente a unas 90.000 toneladas, valorizadas en US\$500 millones al precio del cobre de esa fecha, demandaría tradicionalmente una inversión entre US\$1.500 y US\$2.000 millones para la compra de camiones de extracción, palas gigantes y equipo de molienda. En este contexto, el programa piloto “ha sido un éxito impresionante” acotó el Sr. Adkerson.⁵

Desacoplándose del petróleo, la entrevista indica: “El cobre es clave para alejarse de los combustibles fósiles hacia la energía renovable, ya que el metal rojo se usa en turbinas de viento, baterías para vehículos eléctricos y puntos de carga.”

Luego, indica los resultados: “El programa ya ha generado 9.000 toneladas adicionales este año.”

Acto seguido, la entrevista describe el futuro: “Comparado con muchos otros sectores, el nivel de madurez tecnológica en la minería es aun relativamente bajo. Pero eso está empezando a cambiar a medida que la industria enfrenta presiones para bajar sus emisiones de carbono y su huella física. En depósitos antiguos como Bagdad – donde exploradores llevaron a cabo prospecciones en 1882 y la mayor parte de su abundante cobre ya ha sido extraída – los mineros(as) deben moler muchas más rocas de baja ley solo para mantener la producción pareja. El modelo de *machine learning* que Freeport desarrolló con McKinsey, la consultora, usa datos de sensores ubicados por toda la mina y sugiere nuevas formas para mejorar el desempeño de los chancadores y molinos. El sistema reveló que la mina producía siete tipos distintos de mineral y que el método de procesamiento, que involucra grandes celdas de flotación, podría recuperar más cobre si se ajustara el nivel de pH.”

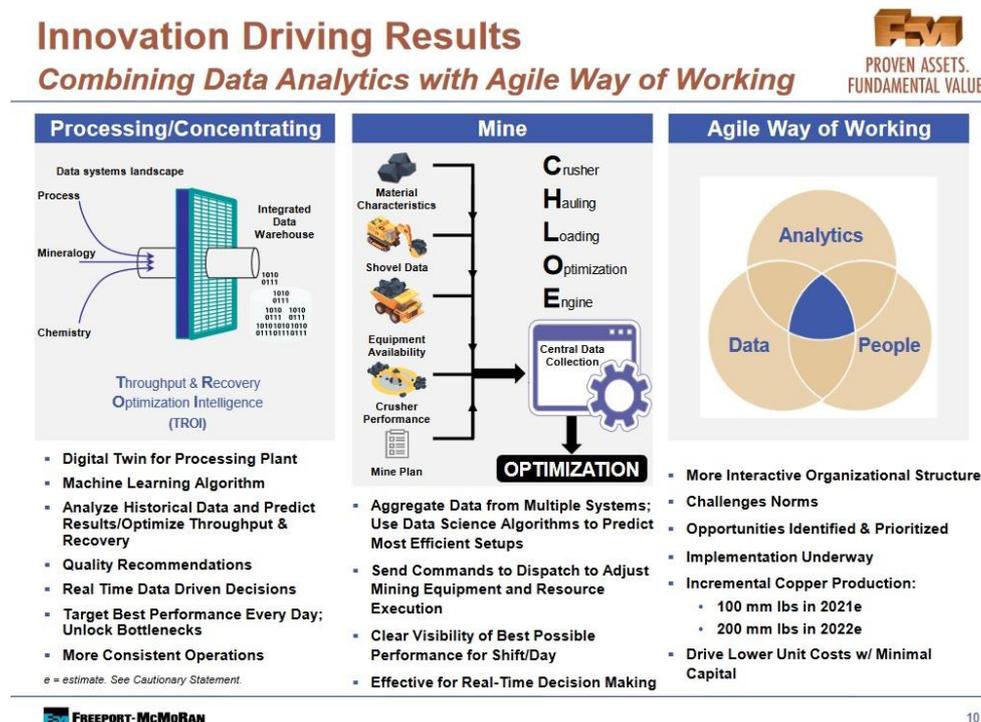
⁴ Freeport-McMoRan Inc. Building on Strength: 2019 Annual Report. Marzo 2020.

⁵ Neil Hume. “Freeport Turns to Artificial Intelligence to Raise Copper Output by 90.000 tonnes: U.S. Company to Roll Out Machine Learning Technology Across Mines in the Americas.” Financial Times. 4 noviembre 2019.



Finaliza diciendo que todas estas iniciativas “generarán más caja que se ocupará para reducir el nivel de deuda e incrementar el valor al accionista.”⁶

En la presentación a los(as) inversionistas para comunicar los resultados a diciembre de 2019, Freeport entregó mayores antecedentes acerca del programa piloto en Bagdad, resumidos en la siguiente lámina:⁷



⁶ Neil Hume. “Freeport Turns to Artificial Intelligence to Raise Copper Output by 90.000 tonnes: U.S. Company to Roll Out Machine Learning Technology Across Mines in the Americas.” [Financial Times](#). 4 noviembre 2019.

⁷ Daniel Gleeson. “Freeport to Invest in Data Science, AI Programs at North/South America Mines.” [International Mining](#). 24 enero 2020.

La presentación a los(as) inversionistas señaló que en los procesos de concentración, Bagdad estableció un gemelo digital para la planta, armado de un algoritmo de *machine learning* que utiliza datos históricos para predecir resultados, optimizando el rendimiento y la recuperación por medio de “recomendaciones de calidad” que apoyan las decisiones. El análisis de datos apoya a los equipos de procesos a resolver cuellos de botella y a establecer metas que reflejan el mejor desempeño posible para cada día. El resultado es una operación más consistente.

En la mina, algoritmos de *data science* toman datos de múltiples sistemas para predecir las combinaciones de equipos más eficientes. A la vez, envían instrucciones al sistema de *dispatch* para ajustar la operación de los equipos y la ejecución del plan minero, visibilizando el mejor desempeño posible por turno por día, apoyando en línea la toma de decisiones.

Se adoptaron métodos ágiles de trabajo, promoviendo una estructura organizacional más interactiva que desafiará apropiadamente las normas para identificar y priorizar oportunidades.⁸

En febrero de 2020, Harry M. “Red” Conger, Presidente y *Chief Operating Officer* - Américas de Freeport junto con dos socios de McKinsey publicaron la historia del programa en Bagdad.⁹ Su mensaje es que la forma en que Freeport aprendió a confiar en un modelo de inteligencia artificial sumado a la intuición de sus veteranos(as) ingenieros(as) en minas y metalurgistas, refleja un cambio sutil pero profundo hacia una “era del operador”, donde solo las mejores compañías lograrán generar utilidades procesando mineral de tan baja ley que solo diez años atrás habría sido descartado como lastre.

Relatan que hacia fines de 2017, los ejecutivos(as) estaban convencidos de que Bagdad, con los equipos existentes, había llegado a un límite de eficiencia, por lo que a comienzos de 2018 empezaron a planificar una expansión de la concentradora para aumentar la producción en un 20 por ciento. Pero, a mediados de ese año, el precio del cobre bajó en un mes de unos US\$3,3 por libra a US\$2,75 por libra, lo que sepultó la posibilidad de la inversión de US\$200 millones para expandir Bagdad.

Señalan que, en cambio, el CEO Richard Adkerson y la *Chief Financial Officer* Kathleen Quirk desafiaron a Bagdad a optimizar los procesos sin una inyección masiva de capital.



⁸ Daniel Gleeson. “Freeport to Invest in Data Science, AI Programs at North/South America Mines.” International Mining. 24 enero 2020.

⁹ El resto del caso está basado en: Red Conger, Harry Robinson & Richard Sellschop. Inside a Mining Company’s AI Transformation. McKinsey & Company. 5 febrero 2020.

Indican que, por lo general, no es simple descubrir mejoras en una mina que ya ha alcanzado una alta eficiencia. Sin embargo, Freeport había estado recopilando información durante diez años, después de que Bert Odinet, *Chief Information Officer*, había coordinado una iniciativa para estandarizar la forma en que cada operación medía y reportaba su desempeño y había construido una base de datos centralizada de tipo *data warehouse* para almacenar la información. Unos años después, los ingenieros(as) de mantenimiento habían instalado sensores de desempeño en los camiones, palas y equipos. Sus técnicos tomaban los datos y manualmente los ingresaban en el *data warehouse* para mejorar las prácticas de mantenimiento y el desempeño de los equipos. Cuando el costo de las redes inalámbricas bajó y su confiabilidad aumentó, Freeport las instaló en todas las faenas, posibilitando la captura de datos en línea sobre el desempeño de los equipos. Dice Odinet: “Aprendimos cosas que nunca habríamos predicho. Ese proyecto nos enseñó a ser más abiertos a lo que la información nos decía. Y nos dio la confianza para probar con análisis más complejos.”

Señalan que los ejecutivos(as) estimaron que las oportunidades más prometedoras para aumentar la producción en Bagdad se encontraban en la planta concentradora, especialmente en la molienda y la flotación. Para capturar dichas oportunidades, pensaron que la forma de trabajo debería evolucionar a métodos ágiles basados en datos. Dice Justin Cross, Gerente General de Bagdad:



“Cuando desarrollamos proyectos operacionales, tendemos a multiplicar nuestra ingeniería. Examinamos cada escenario posible, agregamos protecciones, y hacemos todo lo posible para asegurar que un cambio de proceso resultará en una mejora antes de ponerlo en práctica. Es una forma probada de obtener buenos resultados. Pero toma una cantidad gigante de tiempo, esfuerzo e inversión en capital.” La nueva forma de trabajar adoptaría principios ágiles: (1) desarrollo rápido de soluciones funcionales que después se podrían mejorar, poco a poco, según la retroalimentación de los usuarios(as); (2) colaboración en equipos multifuncionales; (3) trabajo en *sprints* de dos semanas de actividad para diseñar, testear y aprender de un cambio operacional; (4) implementar soluciones apenas éstas alcancen el nivel de *minimum viable product* (MVP); y (5) llevar un listado actualizado de ideas (*backlog*) a desarrollar en *sprints* futuros.

Cuentan que aprender el método ágil tomó tiempo. Shannon Lijek, socia de McKinsey y *coach* ágil en Bagdad, dice: “Cuesta adoptar el método ágil porque no es un proceso que se pueda memorizar. Es un conjunto de principios para minimizar la pérdida de esfuerzo y para lograr más resultados. Hemos visto que la mejor forma de aprender acerca del método ágil es haciéndolo.” Justin Cross señala: “Nos costó un tiempo sentirnos cómodos con lo ágil. Tuvimos que deshacernos de muchos viejos hábitos. Nuestra tendencia era tener todo 100 por ciento perfecto antes de implementarlo. Los y las *coaches* nos impulsaron a trabajar con soluciones que no estaban terminadas. Nos decían: ‘Pueden obtener 60 por ciento de la mejora con un MVP y eso es mucho. Así es que úsenlo. Después pueden preocuparse de mejorarlo.’”

Indican que el equipo que se formó para analizar el desempeño del molino construyó un modelo de *machine learning* para chequear si el molino operaba tan eficientemente como se pensaba. El molino operaba según una receta estándar que fijaba los parámetros para sus 42 *control settings*. El modelo de tipo *extreme gradient-boosting* consistió en un conjunto de miles de árboles de decisión que capturaban un enorme volumen de conocimiento metalúrgico. Pero al examinar en el modelo los datos de los sensores del molino, los(as) integrantes del equipo ágil constataron que desde la perspectiva del molino, la mina estaba produciendo siete tipos distintos de mineral. La receta estándar no cuadraba con las propiedades de todos esos tipos de mineral. Sean Buckley, socio de McKinsey, indica: “Pensar acerca de conjuntos de mineral en términos de información de los instrumentos del molino en vez de clasificaciones geológicas tradicionales, fue un cambio fundamental de paradigma. Nos abrió muchas posibilidades nuevas de mejorar el desempeño.” El análisis indicó que si los *settings* del molino se ajustaban según los siete tipos de mineral, la producción de cobre podría aumentar en al menos 10 por ciento. El equipo ágil construyó un modelo de inteligencia artificial que examinaría el mineral ingresando al molino para recomendar los *settings* apropiados. El equipo diseñó algoritmos que analizaban las conexiones entre el tipo de mineral, las lecturas operacionales de los sensores, la cantidad de mineral pasando por el molino, y la recuperación de cobre. Acto seguido, desarrollaron más algoritmos para predecir el desempeño de la planta basado en las mediciones de los sensores.

Señalan que después de varias semanas de *sprints* de desarrollo, los(as) integrantes del equipo aumentaron la confiabilidad de las predicciones del modelo al 96 por ciento y lo convirtieron en un MVP de modelo de optimización, al que llamaron TROI, que podía emitir recomendaciones cada 12 horas, en línea con cada turno de los operadores(as) del molino. Algunas recomendaciones sirvieron para descubrir fallas en la lógica de TROI, que pasaron al *backlog* y fueron resueltas en los siguientes *sprints*. Una vez que TROI pasó varias pruebas de confiabilidad, el equipo ágil se enfocó en una idea que no había sido probada por la operación tradicional: aumentar la tasa de procesamiento del molino. La prueba se fijó para el 19 de octubre de 2018. Hasta ese momento, los resultados de TROI habían sido marginales.

Recuerdan que esa mañana, el ambiente era de preocupación a medida que los(as) metalurgistas, ingenieros(as) y *data scientists* de Freeport llenaban la sala de control de la planta. Querían ver qué pasaría cuando el molino alcanzara una tasa de operación que no se había probado antes. La posibilidad de dañar el molino estaba en la mente de todos(as). Los(as) integrantes del equipo ágil inicialmente se habían resistido a la idea de que el molino operara más rápidamente. Querían evitar que el acopio de mineral que alimenta al molino bajara del límite mínimo que se había fijado. Su preocupación era que un acopio muy bajo impactaría el desempeño del molino. A las 10:00 A.M., un operador accionó un control en su pantalla de computador para acelerar el sistema de correas transportadoras que llevaban el mineral del chancador al acopio y de éste al molino. Todos(as) en la sala de control observaron los 13 monitores grandes, que brillaban con lecturas de cientos de sensores

de desempeño ubicados alrededor del molino. La cantidad de mineral en el molino subió. Ninguna alarma sonó. Pasaron doce horas. El molino se mantuvo estable. Cuando el acopio de mineral disminuyó bajo el límite mínimo, la entrega acelerada de mineral desde el chancador y el esfuerzo adicional en la mina permitieron que el molino operara sin contratiempos. A medida que pasaron las semanas, el molino mantuvo el ritmo mayor sin pérdida de eficiencia. El modelo estaba en lo correcto: el molino podía manejar más mineral que lo que sus operadores(as) asumían. Dijo Justin Cross: “Ese era el hallazgo que estábamos buscando. Una vez que pudimos operar el molino a su velocidad máxima, supimos que podríamos obtener más resultados de las otras recomendaciones que el modelo estaba ofreciendo.” La producción subió 5 por ciento. TROI había apoyado al equipo a obtener un nivel de desempeño récord, abriendo la expectativa de aumentar la producción de cobre de Bagdad en 20 millones de libras por año.¹⁰

Conclusión

La experiencia de la mina Bagdad con minería de datos y equipos ágiles muestra cómo un equipo de trabajo puede desafiar, con datos, las formas tradicionales de trabajar y obtener resultados significativos.

Reflexionando acerca de la experiencia de Bagdad, Red Conger, Presidente y *Chief Operating Officer* - Américas, indica:



“El esfuerzo de Freeport-McMoRan para aumentar la producción de cobre en Bagdad nos enseñó mucho acerca de cómo usar métodos ágiles y herramientas de inteligencia artificial en nuestras faenas, donde puede ser difícil cambiar rutinas aceptadas. Aquí hay algunas cosas que debemos tener en mente a medida que expandimos el uso de agilidad e inteligencia artificial en otras operaciones de Freeport-McMoRan: (1) no espere a tener el producto ‘perfecto’ antes de empezar a usarlo. Una vez que su solución esté funcionando suficientemente bien, impleméntela. Una acción inmediata produce resultados inmediatos; (2) esté dispuesto(a) a reconsiderar y descartar supuestos y procesos establecidos por mucho tiempo si encuentra mejores formas de hacer las cosas. Esto significa validar

¹⁰ Red Conger, Harry Robinson & Richard Sellschop. Inside a Mining Company’s AI Transformation. McKinsey & Company. 5 febrero 2020.

sus nuevas ideas por medio de análisis de datos y observación en terreno; (3) empodere a los equipos de primera línea a tomar riesgos. Así es como ocurre el testeo y el aprendizaje. Establezca límites claros acerca de lo que los equipos pueden experimentar. Deje en claro que ellos no serán culpados si sus experimentos no cumplen lo esperado o si generan mayores costos; (4) use *data science* para catalizar la toma de decisiones. El criterio y la intuición son difíciles de reemplazar, pero las personas pueden tomar mejores decisiones cuando están respaldadas por hallazgos analíticos; y (5) cuando haya creado valor con lo ágil y la inteligencia artificial, comparta lo que hizo y cómo lo hizo. Compartir el éxito creará interés por estas capacidades y motivará a sus colegas a adoptarlas.”¹¹

Discusión sobre el Caso

1. ¿Cuáles son los objetivos del Programa Piloto en Bagdad?
2. ¿Cuáles son los objetivos de los(as) *stakeholders* (CEO, CFO, COO, Gerente General) con respecto al Programa Piloto?
3. ¿Cómo gestiona Bagdad a los(as) diversos(as) *stakeholders*?
4. ¿Por qué un programa piloto haría sentido en el caso de Freeport?
5. ¿Cuántas transformaciones simultáneas involucra el Programa Piloto?
6. ¿Era seguro el experimento? ¿Qué habría pasado si el molino hubiera resultado dañado?
7. ¿Cómo se logra comprometer a los empleados(as) con el cambio?
8. ¿Cómo se crea un ambiente propicio para la innovación?
9. ¿Cómo se crea un ambiente de aprendizaje?
10. ¿Cómo se compromete a las otras operaciones a adoptar el método ágil y la inteligencia artificial?

¹¹ Red Conger, Harry Robinson & Richard Sellschop. Inside a Mining Company's AI Transformation. McKinsey & Company. 5 febrero 2020.