

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería de Minas

“TRANSFORMACIÓN DIGITAL BAJO LA
TECNOLOGIA ORE SORTING Y SU APLICACIÓN EN
MINAS ARTESANALES”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Nestor Alejandro Rojas Castañeda

Asesor:

Mg. Wilson Carlos Gomez Hurtado

Trujillo - Perú

2021

DEDICATORIA

Lo dedico a Dios quien fue mi guía para culminar con éxito este proyecto. A mis padres José y Mabel, a mis hermanos Jericó, Xavier, Oneil y mi abuela Rosa Obeso quienes han sido siempre mi apoyo y mi gran motivación para seguir adelante.

Nestor Alejandro Rojas Castañeda

AGRADECIMIENTO

Nuestra gratitud está dirigida a Dios por haber puesto en este camino universitario por darme su apoyo incondicional en los momentos difíciles y así poder culminar con éxito mi carrera universitaria.

A mis Padres les agradezco por la oportunidad de cumplir mi sueño de ser profesional Mabel Castañeda, José Rojas además de mis hermanos, Jericó, Xavier y Oneil a su vez de mi segunda madre mi abuela Rosa Obeso por su apoyo moral en todo momento para así lograr mi meta profesional, y a mi docente Ing. Mg. Wilson Carlos Gomez Hurtado de la Facultad de Ingeniería de Minas, por trasmitirme sus conocimientos y observaciones para el desarrollo correcto de la investigación

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
RESUMEN.....	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO II. MÉTODO	20
CAPÍTULO III. RESULTADOS	22
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	43
REFERENCIAS	52
ANEXOS	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Datos de la labor propuesta</i>	68
Tabla 2 <i>Rangos de Ley de los minerales</i>	68
Tabla 3 <i>Mineral ROM</i>	68
Tabla 4 <i>Feed</i>	68
Tabla 5 <i>Sensores aptos para emplear</i>	68
Tabla 6 <i>Ensayo químico</i>	68
Tabla 7 <i>Costos de Booster 2Lb</i>	68
Tabla 8 <i>Costos de detonador</i>	68
Tabla 9 <i>Costo de conexión</i>	68
Tabla 10 <i>Costo de línea / detonador</i>	68
Tabla 11 <i>Aspectos generales de U.M Rodomic Tomic</i>	71
Tabla 12 <i>Indicador de disponibilidad</i>	73
Tabla 13 <i>Indicador del uso de la disponibilidad</i>	73
Tabla 14 <i>Indicador de la utilización efectiva en base a disponibilidad</i>	73
Tabla 15 <i>Indicador de productividad</i>	73
Tabla 16 <i>Indicador de horas efectivas</i>	74
Tabla 17 <i>Indicador de velocidad</i>	74
Tabla 18 <i>Indicador de Payload CAEX</i>	74
Tabla 19 <i>Indicador de neumático</i>	74
Tabla 20 <i>Indicador de combustible</i>	74
Tabla 21 <i>Indicador RETROFIT</i>	75
Tabla 22 <i>Indicador de operador</i>	75

Tabla 23 <i>Indicador de costo de mantenimiento y operación.</i>	75
Tabla 24 <i>Indicador de costo de lubricantes.</i>	75
Tabla 25 <i>Indicador de costo de licencia.</i>	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Costo de línea / detonador.....	23
Figura 2. Indicador de disponibilidad.	24
Figura 3. Indicador del uso de la disponibilidad.	24
Figura 4. Indicador de la utilización efectiva en base a disponibilidad.	24
Figura 5. Indicador de productividad.	25
Figura 6. Indicador de horas efectivas.	25
Figura 7. Indicador de velocidad.	26
Figura 8. Indicador de Payload CAEX.	26
Figura 9. Indicador de neumático.....	27
Figura 10. Indicador del costo de neumático.....	27
Figura 11. Indicador de combustible.....	28
Figura 12. Costos combustibles.....	28
Figura 13. Indicador de RETROFIT.....	29
Figura 14. Indicador de costo de operador.	29
Figura 15. Indicador de costo de mantenimiento y operación.	30
Figura 16. Indicador de costo de lubricantes.....	30
Figura 17. Indicador de costo de licencia.....	31
Figura 18. Capacidad de procesamiento del ore sorting.	38
Figura 19. Cantidad de sensores al adquirir el sistema ore sorting.	39
Figura 20 Nivel de radiación mSv/año.	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo determinar el impacto de la transformación digital en la productividad de las operaciones mineras. El tipo de investigación es básica con diseño no experimental de tipo transversal descriptivo. La muestra se encuentra constituida por las operaciones unitarias de perforación, voladura, carguío, acarreo, planta de beneficio de la minería a tajo abierto y subterránea. Se utilizó la técnica de análisis documental con su instrumento guía de análisis documental. Los métodos empleados fueron el método analítico y el sistemático. Los resultados indican que el diagnóstico de la transformación digital hace que la productividad aumente en las operaciones mineras. El proceso de perforación y voladura en la utilización de detonadores eléctricos hace que la productividad aumente entre el 2 y 7%, mientras que el acarreo y carguío se evidencia en camiones autónomos que mejoraron un 40% la productividad. Se logró describir el proceso de la transformación digital y posterior a eso se elaboró una comparación entre el ore sorting y la transformación digital. Además, la incorporación de un sorter proporcionado por la empresa Wenyao como propuesta para una mina artesanal aurífera, disminuye el porcentaje de dilución. Por lo cual se concluye que la transformación digital en todas las operaciones unitarias analizadas, ha logrado aumentar la productividad, la cual no solo es ventajoso en optimización, sino en la seguridad y vida útil de la mina.

Palabras clave: Transformación digital, productividad, perforación y voladura, acarreo y carguío, planta de beneficio, sorter.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico ha venido promoviendo grandes cambios a nivel mundial, es por ello que, en esta cuarta revolución industrial, la transformación digital se ha ido incorporando a nivel global en las actividades industriales. Esta innovación permite una competitividad logrando así una adaptación y la toma de nuevas decisiones para la implementación, el propósito fundamental es la productividad, competitividad y eficiencia. Es por ello, que la industria minera ha venido compitiendo por el estudio que permita obtener nuevas técnicas o métodos que serán de provecho para sus actividades tanto en la productividad, rentabilidad y tiempo. Las soluciones tecnológicas hacen que las labores mineras sean inteligentes, valiosos y seguros, donde los trabajadores deben estar calificados para ejecutar sus labores a un alto nivel desde una vista más segura (Cabeza, 2018).

Esta nueva digitalización ha ido creciendo significativamente en los últimos años, es donde la región de Atacama, Chile, se encuentra ubicada la mina Candelaria la cual ha desarrollado un sistema de capsulado que ha servido para el cuidado del medio ambiente, seguridad y rentabilidad, es por ello, que esta innovación ha permitido un gran ahorro en recursos y tiempos destinados a las actividades de mantenimiento y operaciones, puesto que esta tecnología hace que los equipos de izaje no sean necesarios para el retiro o desmontaje de este encapsulado, en cuanto a la seguridad, con la disminución del peso se ha minimizado los accidentes pudiendo aumentar así la competitividad (Expomin, 2019).

Así mismo, en el norte de Suecia se encuentra la mina Skellefte, el cual emplea el software GoCAD 3D que permite observar elementos espaciales, geofísicos, geológicos, económicos y geoquímicos del yacimiento; este programa permitió identificar fallas con distinta estructura

interna, estratigrafía y transferencias pre sedimentarias, donde estos datos adquiridos se combinan con este modelo para constituir un modelo geológico en 4 dimensiones. Esto es gracias a la información geográfica temática que se detalla a escalas de yacimientos regionales a yacimientos individuales (Bauer *et. al.*, 2010).

Debido a ello, la industria tiene que estar acorde a los tiempos y sobre todo a la tecnología moderna, tal es el caso que la minería, es una de las actividades que siguen este camino ya que adopta personal humano con diferentes habilidades y capacidades que se requieren hoy en día y máquinas modernas con finalidad de incrementar la producción. Estas innovaciones y tecnologías son primordiales para la evolución de la actividad minera, primordialmente en aspectos de cuidado del medio ambiente, seguridad y ritmos de productividad cada vez más elevados, siendo así una forma de remodelar sus estrategias y técnicas para mejorar en la industria minera (Ruiz, 2020).

La actividad minera es considerada una industria relativamente sencilla con una fuerte intervención sobre la variable productividad, debido a ello, la minería no puede ser ajena al avance tecnológico de esta nueva era denominada la cuarta revolución industrial. En el Perú, la actividad minera a tajo abierto y subterránea es la que mayor tecnología emplea a diferencia de las otras industrias económicas que posee el país, en el caso de la mina a tajo abierto la tecnología ha avanzado un porcentaje más que en la mina subterránea (PwC, 2015).

El aumento en el uso de teléfonos inteligentes, baterías y tabletas, las empresas mineras de tierras raras y litio han presentado un gran incremento en su producción, esto debido al ritmo acelerado que se está viviendo en la actualidad producto de la transformación digital (Arre *et al.*, 2016).

Un nuevo producto que lanza Caterpillar llamado MineStar, esta puede rastrear, automatizar, administrar algunos activos y monitorear, desde personal hasta equipos de productividad y algunos vehículos livianos en el sitio, por lo cual genera una operación más productiva, eficiente y sobre todo seguridad. El tema de seguridad ayudará a que el personal este seguro, ya sea cerca o sobre la maquinaria. A su vez, se encuentra la excavadora hidráulica de ruedas pequeñas, medianas, grandes y las retroexcavadoras de pivote central 420XE, cargadores de ruedas 920 y motoniveladoras 150 AWD (Constructivo, 2020).

La formulación del problema será ¿Cómo ha impactado la transformación digital en la productividad de las operaciones mineras?

Así mismo, se ha realizado una recopilación de investigaciones en el ámbito internacional, las cuales se detallan a continuación:

Infanta (2019) en su trabajo de investigación denominado “Gestión organizacional: La transformación digital como factor cultural”, tuvo por finalidad identificar las brechas que toda empresa debe abordar a la hora de empezar un proceso de transformación digital. La investigación en de tipo cualitativa, en la cual se analizaron diferentes opiniones de ejecutivos, directivos y actores fundamentales dentro de una empresa, para ello, el instrumento de recolección de datos fue la entrevista semiestructurada. Los resultados indican que, si una empresa desea lograr una transformación digital y desarrollar estrategias, competencias directivas con el fin de fomentar una cultura de empoderamiento, la capacidad de experimentar y aprender puesto que el 71% de las empresas están usando esta transformación. La investigación concluye que para la implementación de la transformación digital en una empresa es necesario gestionar el capital cultural de manera adecuada ya que el 100% de los entrevistados indican que uno de los factores que obstaculizan esta transformación es la falta de líderes y el 33% el desconocimiento de esta nueva era.

Haro (2019) en su proyecto de investigación titulado “Madurez digital, primer paso hacia la transformación digital: Desarrollo de un modelo de madurez digital para empresas de manufacturas”, tuvo por finalidad validar un modelo de madurez digital con la capacidad de caracterizar las empresas de manufactura. La investigación es de tipo cualitativa, ya que se analizaron opiniones de las distintas empresas, cuyo instrumento de recolección de datos fue la encuesta. Los resultados indican que, el nivel de madurez digital no varía mucho ya que las líneas del gráfico están cercanas de una con la otra en el nivel de pre infantil que va desde los 21 y 35%, mientras el nivel infantil va entre el 36% y 46%, solo dos empresas cubrieron los niveles de explorador cuyo valor son de 57% y el 67% y ninguna empresa cubrió con los niveles de adulto ni de líder, indicando que varias empresas tienen debilidades en cuanto la aplicación tecnológica. El proyecto concluye que el nivel de madurez digital de las empresas manufactureras se encuentra en un nivel infantil, indicando que varias empresas tienen debilidades en cuanto la aplicación tecnológica.

Udoudo (2010) quién desarrolló “Modelling the efficiency of an automated sensor-based sorter”. El estudio realizado tiene como meta investigar los beneficios en la separación de minerales mediante el uso de un clasificador automático. Esta indagación dedujo que la mala clasificación se debe al tamaño del mineral, ya que sugirió que la granulometría no sea ni muy fina, ni muy gruesa, además de que si se adiciona el sistema ore sorting la eficiencia de separación aumentaría entre el 1 al 30 %, además al separar la mayor cantidad de partículas de mineral se estaría disminuyendo la dilución presente en el material extraído. Hay que destacar que su indagación brotó después de darse cuenta de que las partículas de mena, debido a la dilución presente, eran destinadas a un depósito de rechazo debido a una mala clasificación, percatándose que si juntaba todas esas

partículas formarían una cantidad considerable para su procesamiento, ahí surgió la idea de analizar qué beneficios traería un sistema de clasificación automático para la empresa.

Tenemos a Carcausto (2019) en su investigación sobre “Optimización de Capex – Opex en la explotación de desmontes de mineral estaño de baja ley mediante la tecnología Ore Sorting en la Unidad Minera San Rafael - Minsur S.A. – 2019.”. Esta investigación tuvo como propósito recuperar los minerales de estaño de baja ley que están depositados en el área de desmontes mediante el ore sorting. Entre los resultados se encontró que dicha unidad minera cuenta con 245,000 TM de material en el área de desmontes con una ley que va de 0.60% a 0.90%. Esta investigación concluyó que trabajar con el sistema ore sorting puede ser beneficioso, puesto que la empresa cuenta con una gran cantidad de material en las desmonteras lo cual trabajar con dicho material significaría beneficio para la empresa. Esta tesis fue de importancia para la investigación debido a que resalta la efectividad del ore sorting al querer recuperar minerales que se hayan en el área de desmontes.

En otra tesis expuesta por Valdivia (2017) quien presentó “Estudio geológico y control de calidad (QA/QC) en la unidad minera Arcata”. Propuso planificar un control adecuado acerca de la calidad del mineral y la dilución presente. En el cual presentó como resultados que el porcentaje de dilución es de 90.55% y que con el ore control, se redujo el porcentaje de dilución en un 17.9 %, obteniendo mayor cantidad de onzas troy de oro. Esta tesis concluyó que la principal causa que provocó la dilución en el proyecto es el cambio repentino del rumbo y buzamiento de las vetas, pero gracias al ore control y con la ayuda de otros softwares como MineSight y el GEMM se pudo disminuir la contaminación de cuando se extrae el mineral. Este estudio aportó a la investigación una nueva perspectiva para abordar y solucionar la problemática a la dilución presente en minería.

Por otro lado, se ha realizado una recopilación de investigaciones en el ámbito nacional, las cuales se detallan a continuación:

Morales (2020) en su trabajo de investigación titulado “Transformación digital: Conceptos claves y casos de éxito en el Perú”, tuvo como objetivo mostrar casos de éxito y conceptos claves proporcionados por diferentes autores sobre la transformación digital en el Perú. El tipo de investigación es cualitativa de diseño descriptivo, al instrumento de recolección de datos se ejecutó análisis documental. Los resultados indican que la tienda platanitos el 70% de sus ventas han sido online la cual implementaron el big data como un control, así mismo la telefónica del Perú y el BBVA se han beneficiado con este desarrollo. El autor concluye que la transformación digital es una forma de ayudar a repensar el modelo de negocio y el valor entregado al cliente, teniendo en cuenta a los participantes en la cadena de valor y la estrategia que involucra nuevas tecnologías; además, su éxito depende de cambios en la cultura, organización, leyes, tecnología, condiciones laborales y cambios en la infraestructura.

Medina y Barriga (2019) en su trabajo de investigación titulado “Uso de las tecnologías de la información (Tics) en operaciones mineras artesanales”, tuvo como objetivo implementar la aplicación APP para el diseño de una red de perforación y voladura, con la finalidad de poder optimizar la operación de minado, para lo cual se pretende utilizar las técnicas de la información y comunicación conocidas como Tics. El tipo de investigación es experimental, descriptivo comparativo y las técnicas de recolección de datos empleadas son las observaciones, mediciones, datos de campo, softwares y tesis bibliográficas. El autor concluye que debido a la implementación de las Tics se ha logrado obtener de tamaños homogéneos lo que repercute en un mejor proceso del carguío y acarreo, logrando de esta manera reducir los costos de producción en un 30% y se optimizo un 96%.

Hernández (2017) en su trabajo de investigación titulado “Gestión de la tecnología en los proyectos de innovación de una empresa peruana del sector minero. Un estudio de caso”, tuvo como objetivo analizar y estudiar la gestión de la tecnología en empresa peruana dedicada al rubro minero, con el fin de proponer un modelo de gestión de la tecnología que ayude a mejorar el desempeño de la empresa. La metodología de la investigación corresponde a un estudio de caso múltiple, de tipo descriptivo y de enfoque cualitativo. El autor concluye que las funciones de gestión tecnológica desarrolladas por las empresas mineras a gran escala son "implementación y protección" y "activación y planificación parcial", mientras que la función de "monitoreo" es una función desarrollada en menor escala. Asimismo, los proyectos con mayor inversión son los proyectos con mayor impacto, los más elogiados por la alta dirección y la mayor escala de desarrollo tecnológico.

La transformación digital se refiere a un reciente modelo de organizar y de controlar el proceso del producto durante todo su ciclo de vida, este proceso es llamada transformación digital. Esta revolución industrial es originada por los avances tecnológicos, principalmente informáticos y de software. Este término “digital 4.0” se utilizó por primera vez en Europa, donde establece y relaciona la tecnología digital y física entre ellas tenemos el internet, robótica, computación en la nube, fabricación auditiva, etc. (Galaz, 2018).

La cuarta revolución industrial se inicia debido al impacto disruptivo de las tecnologías digitales utilizadas a los modelos de la industria (Anexo 4: La cuarta revolución industrial). La inteligencia de la reciente transformación digital es el resultado de la tecnología de la información y el proceso de la organización, donde las personas serán claves para esta nueva revolución en la transformación digital para así recuperar la competitividad (Del Val, sf).

El objetivo de la transformación digital es conseguir una mayor productividad, eficiencia y competitividad, para ello se debe comprender y resaltar el impacto positivo que comprende la cuarta revolución industrial, donde conlleva una procedencia de ser competitivos, desarrollando el modelo y organización de actividad que se tiene. Otro punto importante en esta cuarta revolución es la eficiencia de los recursos energéticos que se usan en cada actividad industrial (Cabeza, 2018).

Esta transformación digital promete llegar a una nueva producción, la cual los beneficios para esta revolución industrial son los siguientes: Mayor productividad y eficiencia en los procesos, ya que habrá mayor velocidad en las operaciones y un mejor rendimiento, obteniendo la posible fabricación continua y la eficaz gestión en los recursos, el estudio de datos logrados para la eficiencia (Anexo 5: Áreas de estudio del proceso de digitalización). Si se decide por la nueva transformación digital es importante conocer las herramientas fundamentales que nos conviene para nuestra actividad minera (Cabeza, 2018).

Cabeza (2018), indica que ante esta nueva revolución se debe estudiar a fondo sus características de cada elemento para el proceso de digitalización (Anexo 6: Procesos de estudio).

La inteligencia artificial viene ser un sistema donde se replica las habilidades humanas, donde se usa para labores repetitivas, donde es reemplazado la labor humana por máquinas que suelen operar solas. Por otro lado, permite que una información de gran volumen de datos diversos distinga patrones y gatille acciones determinadas. Es así que estas aplicaciones se dan de una manera flexible y a un corto plazo siendo su propósito la reducción de costos y tiempos muertos (CEPAL, 2019).

Esta transformación digital presenta 5 desafíos para las actividades industriales: La primera son las estrategias comerciales y el modelo operativo las cuales permiten generar ganancias en el mercado, la segunda es la innovación ya que es importante estar innovando para tener nuevas ideas

y actuar ante los nuevos competidores, la tercera es la experiencia al cliente con el diseño y ejecución de estilos memorables para los clientes, la cuarta consiste en la importancia de que las operaciones y tecnología sean incorporadas en las labores para generar valor en el negocio y por ultimo tener en cuenta los riesgos digitales que se puedan presentar, así mismo, tener en claro la manera de cuidar, proteger la reputación e información (Escudero, 2018).

Para la minería se puede considerar 4 futuros la cual se ha basado en cómo operan (Anexo 7: Explorando en el futuro). La primera consiste en como las nuevas empresas mineras van variando el sector, la segunda es la confianza de los proyectos mineros y la medida en que la parte interna obtenga un gran control del privilegio en la operación minera.

La productividad se define a la relación que hay entre el número de insumos y los recursos usados para obtener un material determinado, por lo cual este incide de manera directa o indirectamente en el desempeño económico. La productividad no solo se ve afectada por la caída de la ley del mineral o por la calidad de los recursos geológicos, sino también por aspectos sobre gestión empresarial, la tecnología y recursos humanos (Arre et al., 2016).

El proceso de desarrollo minero se define en dos aspectos, el primero la demanda por productos minerales (Anexo 8: Etapas de desarrollo), donde se realiza exploraciones mineras, aunque en la gran minería las etapas se definen de manera más profunda, entre ellas tenemos: Determinación del área a explorar, campo y resonancia magnética, mapeo, muestreo geofísico y geoquímico, planeación de targets, perforación diamantina inicial, avanzada y evaluación de recursos (Ruiz, 2020).

La perforación y voladura es la primera etapa en la minería, como propósito arrancar el estéril o mineral del macizo rocoso, dando paso a la excavación o banco, esto dependerá si esta operación es subterránea o a cielo abierto. Sea cual sea la operación, si existe una excelente

perforación y voladura la obtención del material fragmentado será el adecuado, así facilitará las siguientes etapas de las operaciones mineras, además permitirá minimizar el consumo de los explosivos. Esta perforación se ejecuta con máquinas que combinan efectos de rotación y percusión, por otro lado, la voladura es el arranque del material producido por la acción del explosivo (SERNAGEOMIN, 2014).

El carguío y acarreo es la continuación de la segunda etapa en las operaciones mineras, donde el material mineralizado del yacimiento es cargado ya sea por un vehículo como por ejemplo un volquete, por un transporte hidráulico o por transporte de fajas transportadoras, para luego ser transportado en dos puntos o lugares a los que se asigne hasta llegar a la planta para su debido procesamiento, donde el parámetro de la producción mejorará la producción de mineral en esta etapa por ello se observa la cantidad de toneladas que han sido transportadas (Chuctaya y Larota, 2020).

La planta de beneficio es una instalación industrial o semi industrial cuyo propósito es el tratamiento del material que ha sido explotado, con esto se recupera la pureza del mineral o compuestos de interés (Ministerio de minas y energía, 2015). La propuesta de implementación de una nueva tecnología en una empresa para Ponce (2016), está relacionada con la finalidad de conseguir mejores resultados en una organización y para esto se reemplazará, adicionará o mejorará alguna tecnología o proceso dentro de la compañía para así aumentar los resultados o disminuir la problemática a la que se enfrente la empresa. Una nueva propuesta totalmente analizada y estudiada siempre producirá una serie de beneficios. Dentro de los beneficios que conllevaría la propuesta de implementación del sistema ore sorting dentro de una empresa minera según Condori (2018), son la obtención de mayores recuperaciones, disminución en el porcentaje de dilución y el incremento de la ley del mineral, como sucede en la minera San Rafael que aumento su porcentaje de

recuperación de 90.5% a 93.5%, también incremento la ley del mineral, quienes pasaron de una ley de 0.8% a 2.5%, igualmente está el aumento en vida útil de la mina, y esto porque se estarían utilizando reservas que no se tuvieron en consideración en ningún plan de minado. La eliminación de pasivos ambientales es un beneficio que no se puede dejar de lado, ya que al tener menor cantidad de estéril se estará generando menor cantidad de ácidos en los desmontes y relaves, entre otros beneficios que traería la incorporación de dicho sistema al proceso productivo de la empresa.

Debido a ello, la presente investigación tiene como propósito definir las distintas herramientas, máquinas tecnológicas que se viene dando en la industria minera, por ejemplo, una tecnología llamada Ore Sorting que es una de las últimas novedades; los camiones o máquinas autónomas; los drones y la robótica, para así mejorar los niveles de seguridad (Convention Mining, 2021).

A causa de este problema se plantea esta investigación titulada “Transformación digital para la productividad de las operaciones mineras” debido a que esta nueva era tecnológica es primordial para el desarrollo de la actividad minera ya que la productividad aumentó, para el cuidado del medio ambiente y cuestiones de seguridad, siendo así una forma de remodelar sus estrategias y técnicas para mejorar en la industria minera. Esta tecnología permite una mayor automatización en las mejoras del proceso y un nuevo nivel de eficiencia y capacidades de respuestas al cliente que antiguamente no era posible.

Se logró determinar como la transformación digital aumenta la productividad de las operaciones mineras. Para el cual se tuvo que analizar la transformación digital en la productividad del proceso de perforación y voladura, analizar la transformación digital en la productividad del proceso de carguío y acarreo, analizar la transformación digital en la productividad del proceso de

beneficio y finalmente proponer el ore sorting para una mina artesanal. Se demostró que la transformación digital aumenta la productividad de las operaciones mineras.

CAPÍTULO II. MÉTODO

La investigación presenta el enfoque cuantitativo, ya que el análisis estadístico se elaboró en base a la medición, donde se ha analizado el impacto de la transformación digital en la productividad de las operaciones mineras. Según el conocimiento perseguido, la investigación es de tipo Aplicada, partiendo del análisis documental logró medir el impacto de la tecnología 4.0 en las operaciones mineras, según la planificación en las mediciones o recolección de datos, la investigación es de tipo retrospectivo, según el número de mediciones en un determinado tiempo, la investigación es de tipo transversal, según la intervención del investigador, la investigación es no experimental ya que se caracteriza porque las variables sometidas a estudio no han sido manipuladas, solo han sido medidas. Dado que para cumplir con el último objetivo propuesto se requirió extraer distintas muestras del área de desmontes de una mina artesanal aurífera, las cuales fueron enviadas a ser muestreadas para determinar si existe presencia de minerales en el área de desmonte producto de las actividades de pallaqueo.

La población se encuentra conformada por la tecnología 4.0 implementada en las operaciones mineras a tajo abierto y subterránea. La muestra se encuentra constituida por las operaciones unitarias de perforación, voladura, carguío, acarreo, planta de beneficio en minería a tajo abierto y subterránea. Entre los criterios para seleccionar la población se ha considerado los criterios de inclusión y exclusión. Por un lado, en los criterios de inclusión se consideró las operaciones unitarias especialmente el proceso de beneficio. Adicionalmente se consideró el área de producción

en la cual iría dirigida la propuesta del sistema ore sorting el cual reemplazaría las actividades de pallaqueo. Por otro lado, entre los criterios de exclusión no se tuvo en cuenta el área de SSOMA, administración minera, ni demás áreas presentes de la empresa ya que no están relacionadas con la intención de la investigación, por ende, quedan excluidas del estudio.

Además, la muestra estuvo comprendida por las operaciones unitarias de perforación, voladura, carguío, acarreo, planta de beneficio en minería a tajo abierto y subterránea. Según la Universidad Naval (2016), precisa que la muestra es un subconjunto definido por ciertas características de la población, la cual debe ser totalmente representativa, ya que será la esencia de la población. El muestreo se determinó mediante una selección no probabilística, ya que la selección de las empresas se realizó tomando en cuenta peculiaridades específicas del objeto de estudio, además se trabajó recurriendo al muestreo por conveniencia puesto que las empresas elegidas tienen las características que el investigador necesita para la elaboración de la tesis. En cuanto a la unidad de análisis que forma parte del informe de investigación, estuvo constituida por el área de producción, puesto que dicha área fue dirigida la propuesta del sistema ore sorting con la intención de disminuir el porcentaje de dilución que se produce en los frentes de explotación.

Se empleó la técnica de análisis documental para el recojo de los datos se utilizó la guía análisis documental, los datos se tomaron de fuentes confiables y de repositorios institucionales, del ámbito internacional y nacional, entre ellos se considerarán a artículos científicos, revistas indexadas y trabajos de investigación que permitan estudiar las variables y el objeto de estudio.

Las consideraciones éticas que se tuvieron en cuenta en el desarrollo de la investigación: se analizó la automatización de los procesos en el sector minero, los cuales han ayudado a ganar eficiencia, sostenibilidad y seguridad en cada una de las operaciones en donde han sido implementadas; no afectó al ser humano ni al medio ambiente, ya que es una investigación de tipo

documental que solo buscó un aporte al conocimiento dando a conocer las nuevas era del siglo XXI, el tesista tuvo la capacidad para decidir analizar e interpretar de manera autónoma los datos recogidos durante el desarrollo de la investigación, en el desarrollo del informe de investigación se respetaron los datos adquiridos de diferentes fuentes de información esto con la finalidad de llevar a cabo una investigación con justicia y equidad.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Diagnóstico de transformación digital en las operaciones mineras.

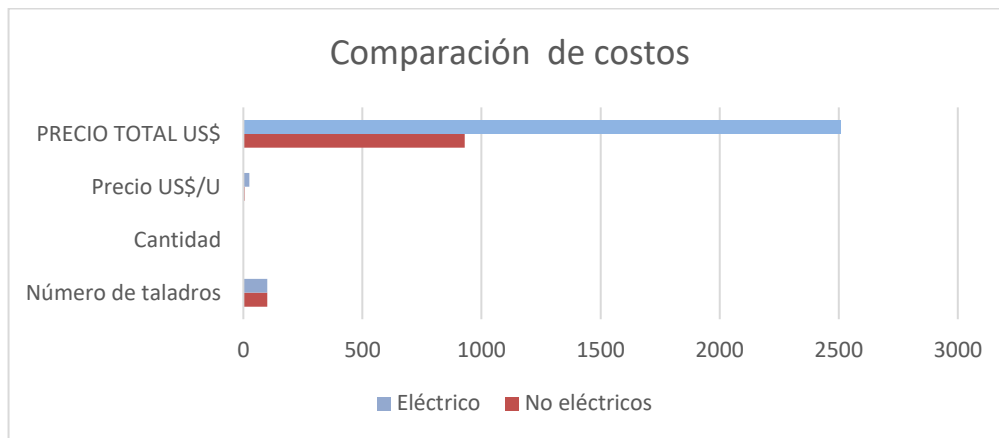


Figura 1 Costo de detonador (Booster 2Lb)

Los costos de detonadores y taladros se tomaron de la Unidad Minera

Toromocho (Romero, 2016)

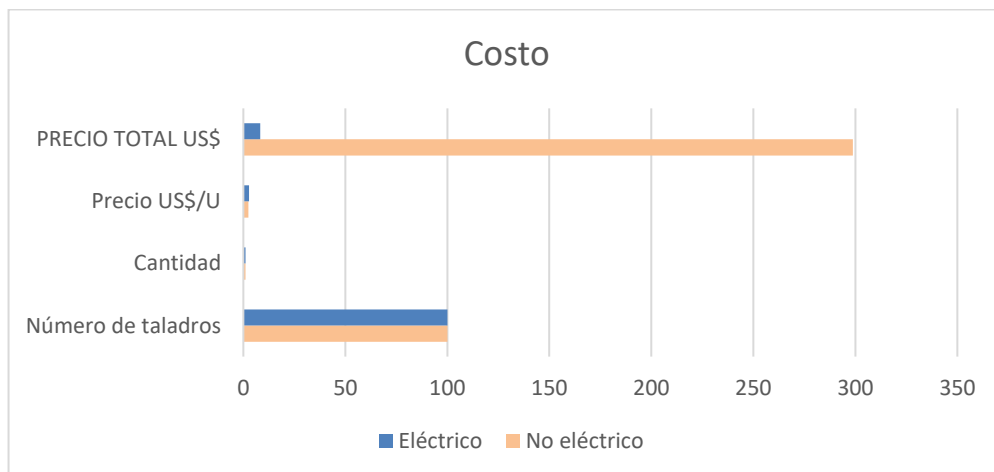


Figura 2 Costo de conexión.

Los costos de detonadores y taladros se tomaron de la Unidad Minera Toromocho

(Romero, 2016)

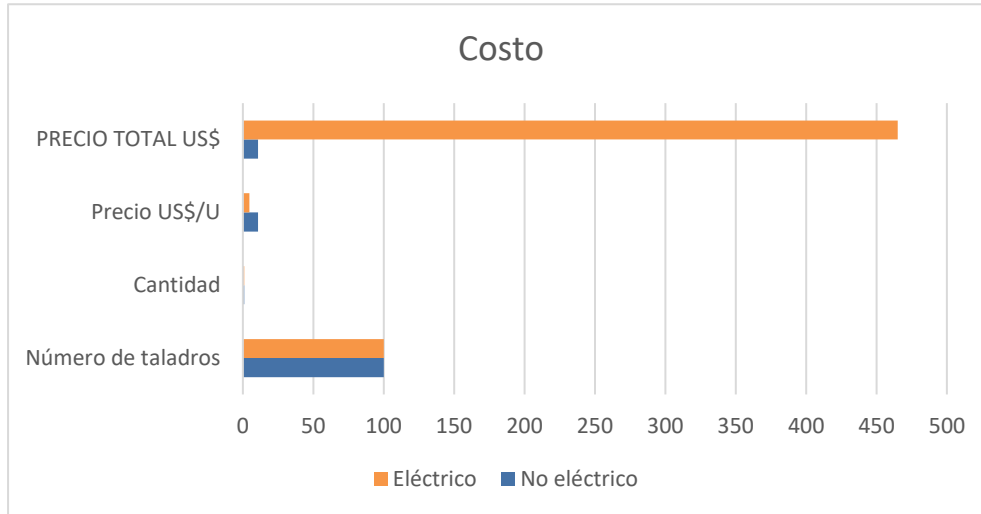


Figura 3. Costo de línea / detonador

Los costos de línea/detonador se tomaron de la Unidad Minera Toromocho (Romero, 2016).

INDICADORES DEL CAMIÓN 930E

A continuación, se mostrarán a través de tablas y figuras los indicadores del camión 930E.

Indicador de disponibilidad

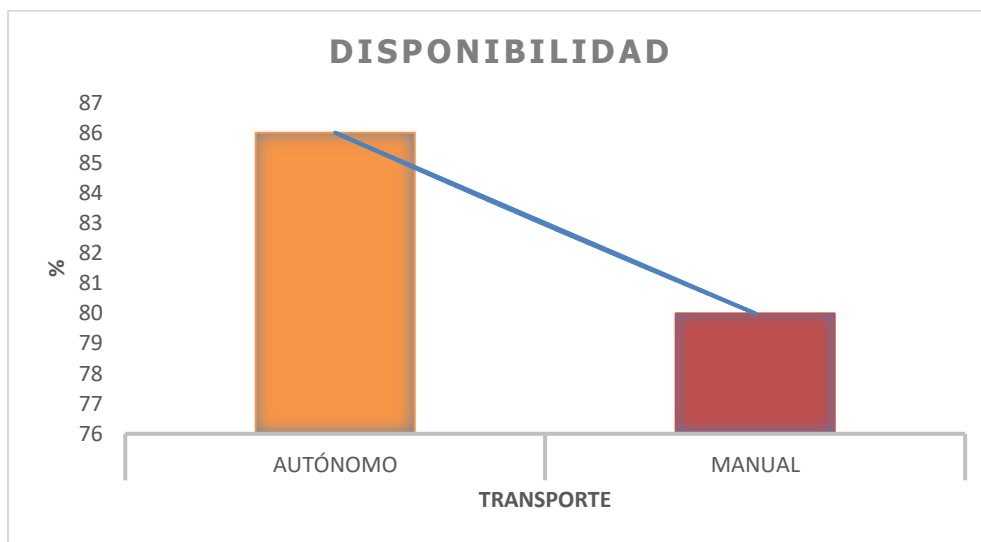


Figura 4. *Indicador de disponibilidad.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

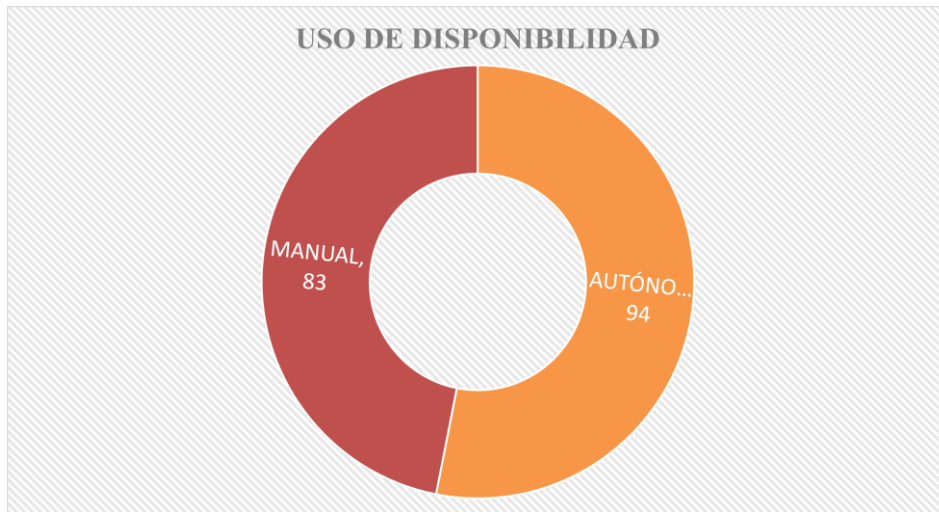


Figura 5. *Indicador del uso de la disponibilidad.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

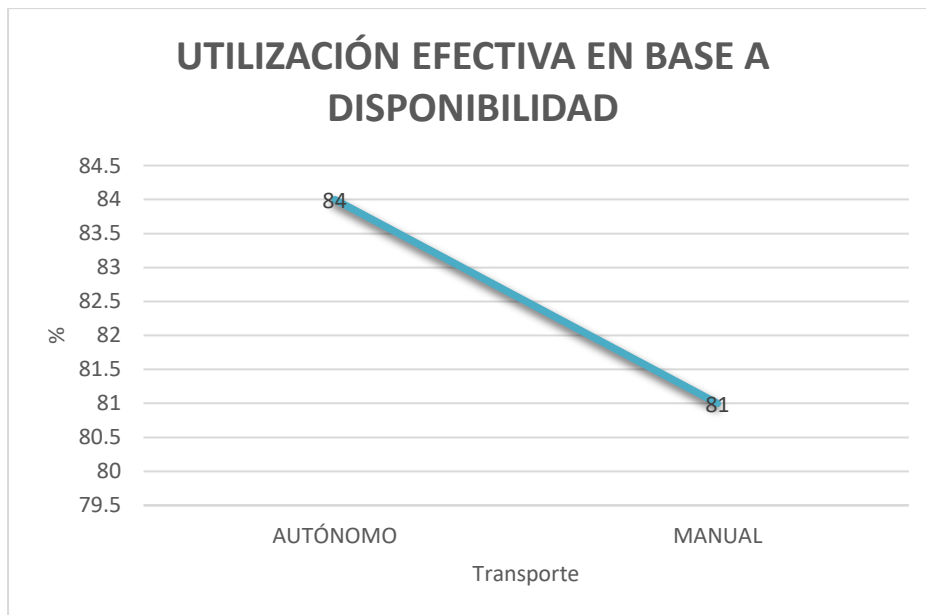


Figura 6. *Indicador de la utilización efectiva en base a disponibilidad.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de productividad

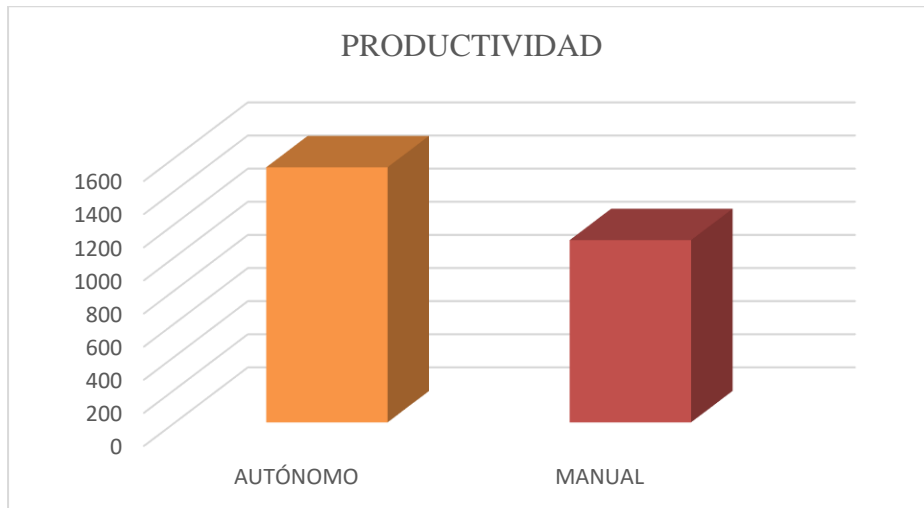


Figura 7. *Indicador de productividad.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de horas efectivas

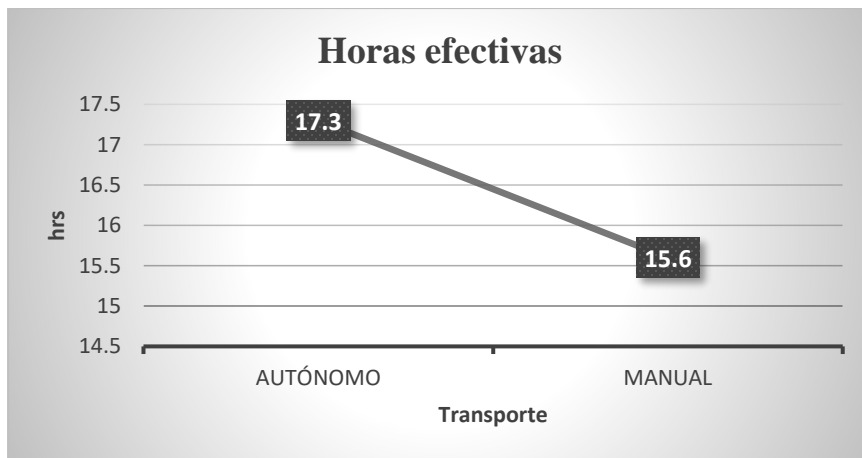


Figura 8. *Indicador de horas efectivas.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de velocidad

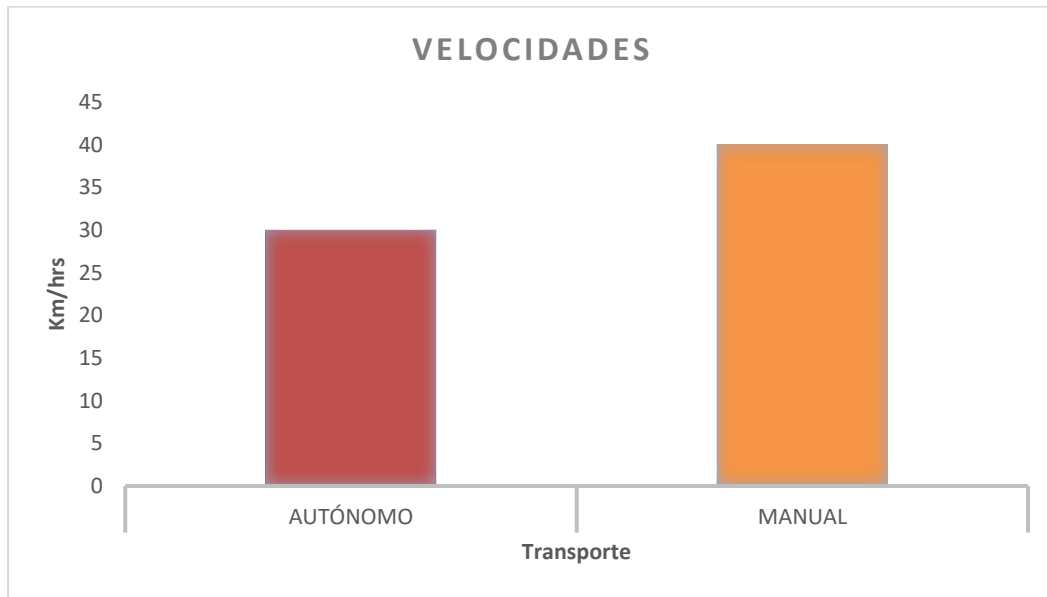


Figura 9. Indicador de velocidad.

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de Payload CAEX

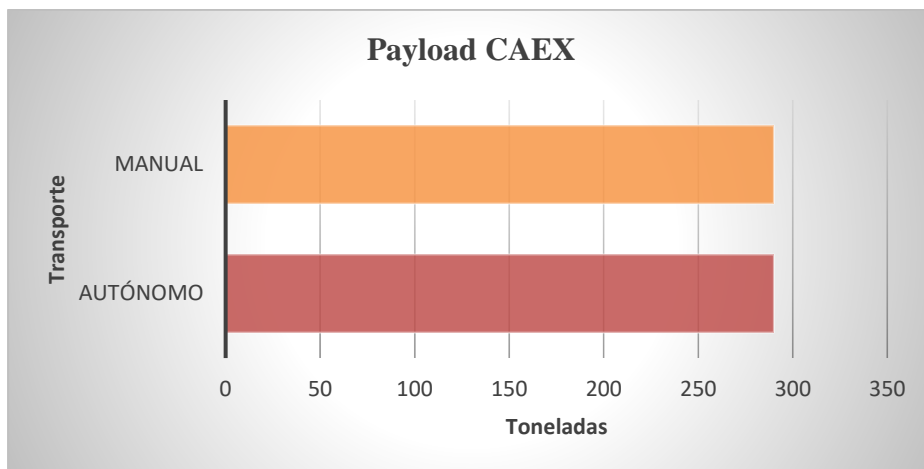


Figura 10. Indicador de Payload CAEX.

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de neumáticos

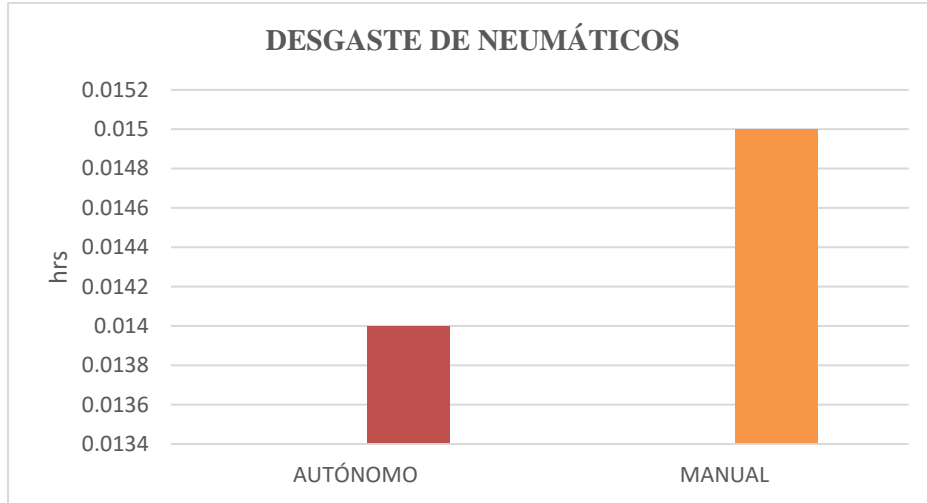


Figura 11. *Indicador de neumático*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

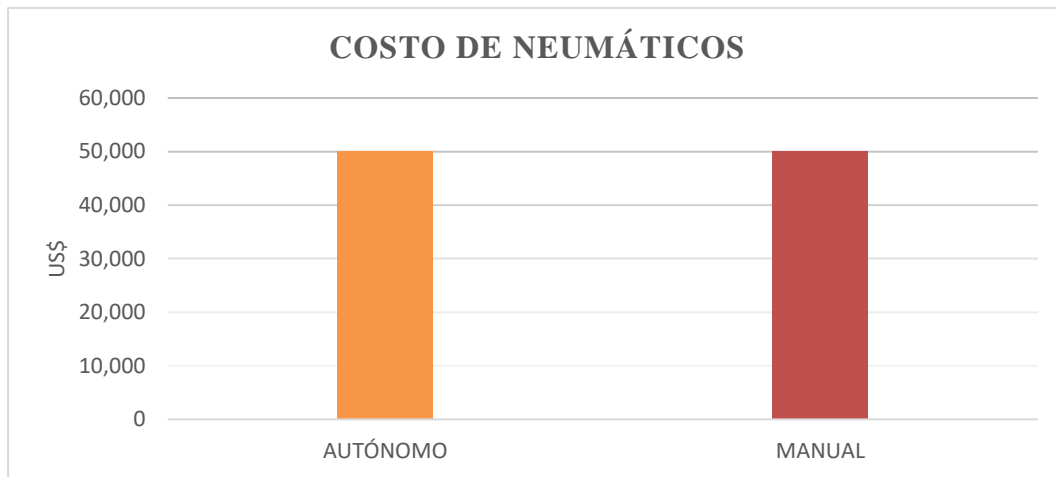


Figura 12. *Indicador del costo de neumático.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de combustible

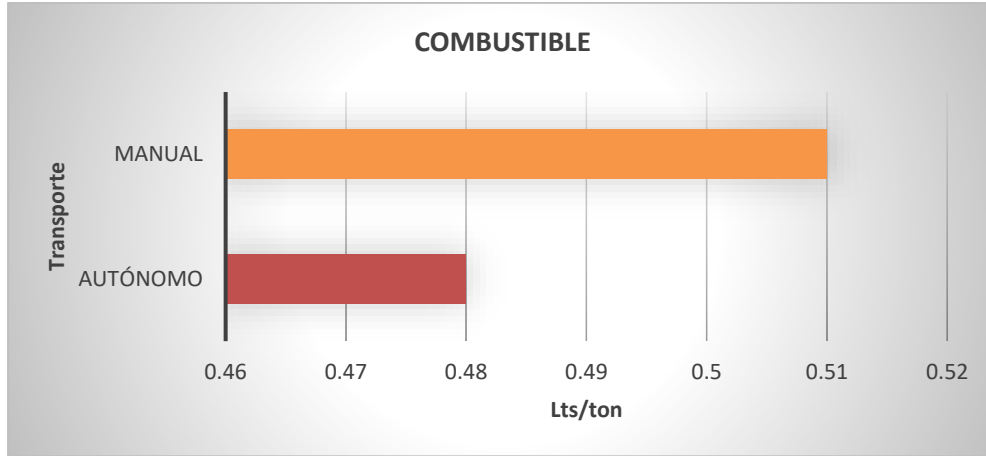


Figura 13. *Indicador de combustible.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

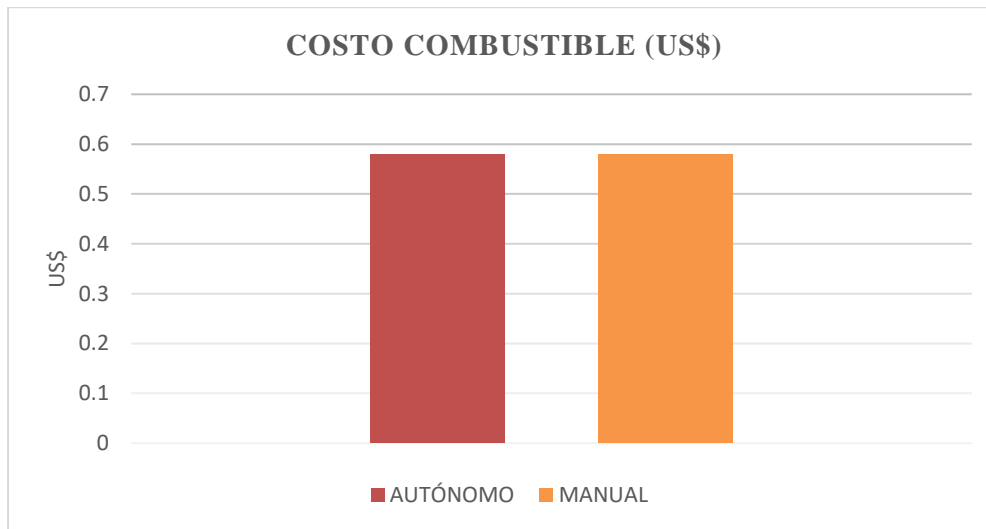


Figura 14. *Costos combustibles.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de RETROFIT

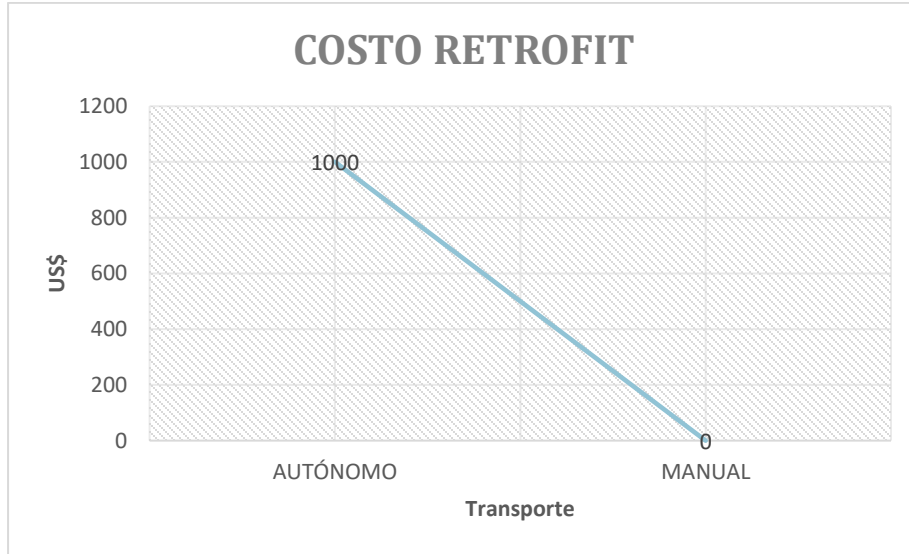


Figura 15. *Indicador de RETROFIT.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de costo de operador

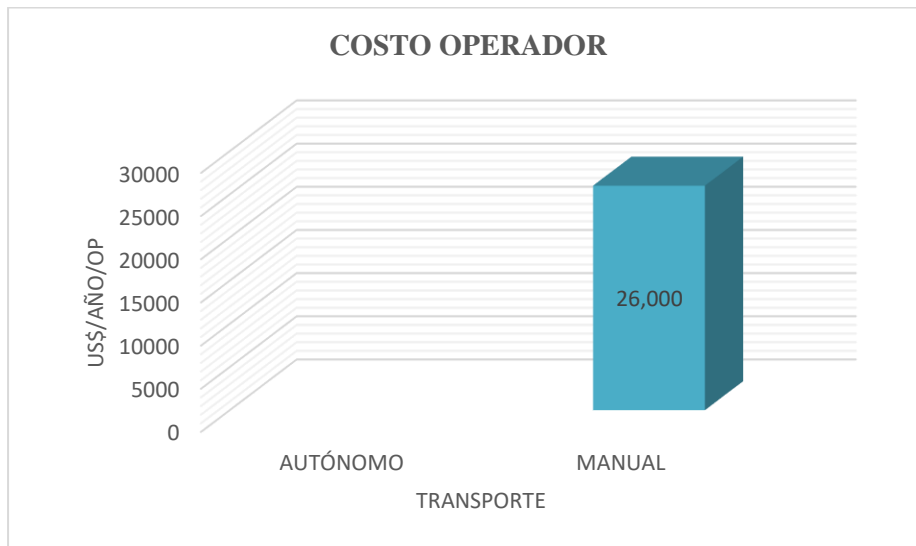


Figura 16. *Indicador de costo de operador.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de costo de mantenimiento y operación

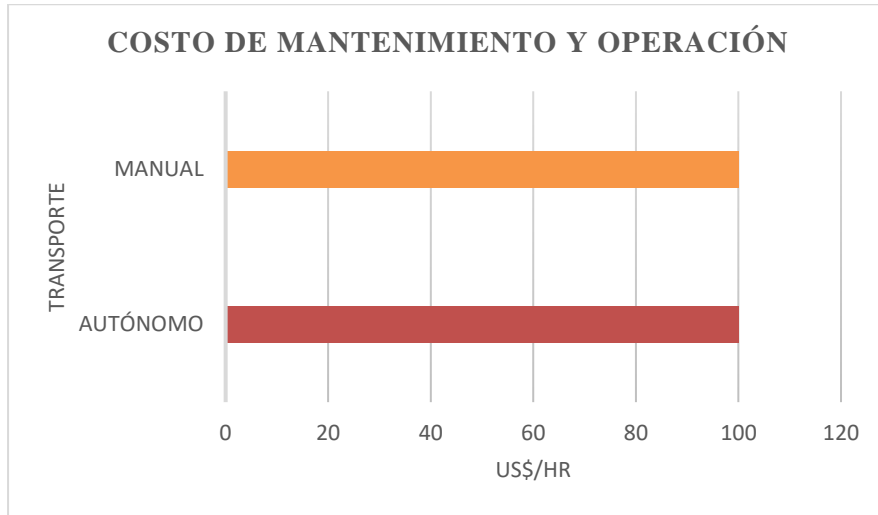


Figura 17. *Indicador de costo de mantenimiento y operación.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de costo de lubricantes

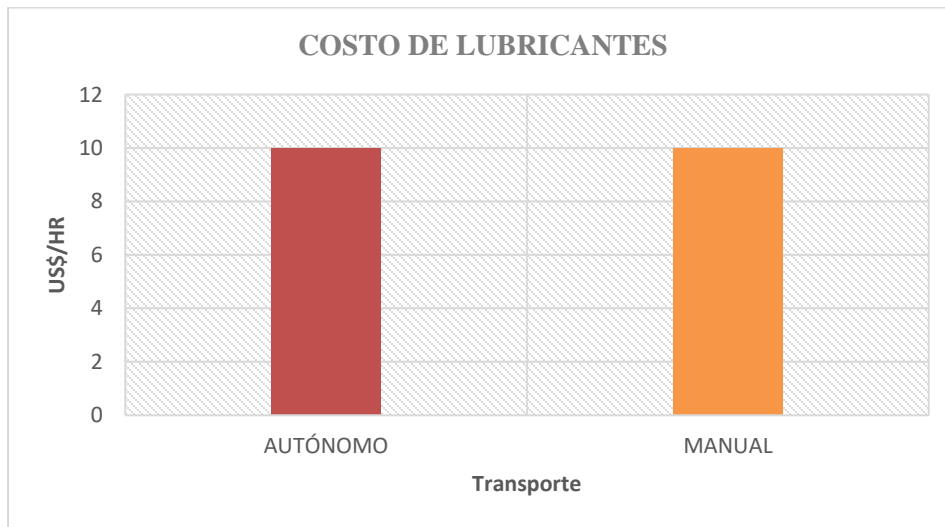


Figura 18. *Indicador de costo de lubricantes.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

Indicador de costo de licencia

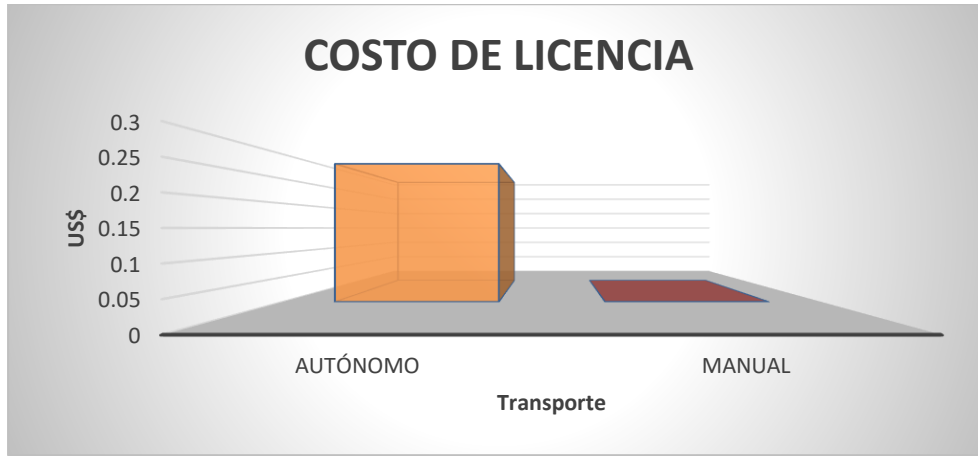


Figura 19. *Indicador de costo de licencia.*

Los datos que se presentan son tomados de la Unidad Minera Radomiro Tomic (Mujica, 2019)

3.2. Representar el proceso de la transformación digital



Figura 20. *Proceso de transformación digital.*

Los datos que se presentan es el proceso de transformación digital

3.3. Comparar la transformación digital con el proceso de ore sorting

TRANSFORMACIÓN DIGITAL	ORE SORTING
Transformación de los procesos mineros mediante la aplicación de sistemas digitales tales como computadoras, sensores, equipos autónomos, entre otros, que utilizan el Internet, computación cognitiva y digital para operar.	Se combina la computación con tecnologías de rayos x o cámaras de alta resolución para identificar características del mineral o desmonte para separarlos antes de ingresar a la planta concentradora; cada partícula es identificada y seleccionada de manera que el equipo la rechaza o le da paso mediante salidas de aire de alta presión colocadas al final de fajas transportadoras.
Contribuye a optimizar los procesos y mejorar la competitividad.	Prolongar la vida útil de la mina y aumenta el valor del yacimiento.
Se centra en la mayor recuperación y menor consumo de recursos, logrando una mayor eficiencia en los procesos.	Se usa para incrementar leyes inferidas que se consideran con poca probabilidad de recuperación por otro método. Aplicable para la minería tanto en carbones, sulfuros, oro, entre otros.
La transformación digital puede ayudar a eliminar las muertes y lesiones en entornos de alta energía.	Aporta menor intervención de la persona, minimizando el riesgo del factor humano.
La minería inteligente permitirá automatizar y remotizar procesos, es decir las operaciones se	La automatización de la clasificación del mineral, si se aplica en las etapas iniciales,

<p>podrán realizar de manera remota, aumentando la seguridad de las personas y la producción dentro del yacimiento.</p>	<p>fácilmente podría elevar la ley de corte y la eficiencia en un 30% entre el mineral y el estéril.</p>
<p>La transformación digital puede genera un cambio radical en la intensidad de capital y los costos operativos, se contarán con nuevas reservas de los yacimientos que no se podían extraer previamente y una menor huella ambiental a través de la minería selectiva y las operaciones escaladas al yacimiento.</p>	<p>Ofrece efectos positivos significativos y tiene el potencial para revolucionar el modo en que se diseñan y operan los circuitos de procesamiento de minerales, y, en consecuencia, como se evalúan los nuevos recursos y reservas mineras.</p>
<p>La tecnología 4.0 ha presentado recientes desarrollos tecnológicos en sensores y la capacidad de procesamiento de datos, que han hecho que la selección de minerales sea una solución viable para muchos de los desafíos de la industria minera.</p>	<p>La clasificación de partículas con el sensor de transmisión de Rayos X, tipo XRT está basada en una proyección plana de la atenuación de Rayos X de una corriente de partículas. Estas se distribuyen rápido y son escaneadas y evaluadas individualmente mientras pasan los minerales.</p>

3.4. Propuesta Tecnológica de Ore Sorting para una Mina Artesanal Aurífera

Tabla 1. Datos de la labor propuesta

Características de la labor	
Tipo de labor	Galería
Sección	2.4 m x 2.0 m
Tipo de depósito	Vetas angostas
Producción diaria	25 Tm
Potencia	De 0.01 m a 1.5 m
Buzamiento	68° a 78°
Tipo de mineral	Óxidos y sulfuros
Morfología de la veta	Irregular
Método de explotación	Corte y Relleno (Ascendente y descendente)
Método selectivo	Técnica de Circado

Fuente: elaboración propia, 2021.

Tabla 2. Rangos de Ley de los minerales

Ley mínima del mineral	
Oro (Au)	9 a 38 gr/Tn
Cobre (Cu)	7%/Tn
Plata (Au)	4 a 12 oz/Tn
Zinc (Zn)	4%/Tn

Fuente: elaboración propia, 2021.

- **Porcentaje de dilución**

Los valores presentados anteriormente fueron totalmente necesarios para calcular el porcentaje de dilución presente de acuerdo a una labor promedio en minería artesanal. Para el contexto del estudio se aplicó fórmula propuesta por Alan O’Hara.

Fórmula 1. Cálculo del porcentaje de dilución

$$\% DIL = \frac{25}{\sqrt{A.V.} * Sen. Buz}$$

% DIL= porcentaje de dilución

A.V = Ancho de la veta o potencia

Sen. Buz= Seno del buzamiento

Fuente: Quick guides to the evaluation of orebodies, 1980.

A continuación, se procede a calcular el porcentaje de dilución con los datos promedio de una labor minera artesanal, es decir una potencia de 0.6m y un buzamiento de 72°:

$$\% DIL = \frac{25}{\sqrt{A.V.} * Sen. Buz}$$

$$\% DIL = \frac{25}{\sqrt{0.60} * 0.940}$$

$$\% DIL = 34.33 \% \approx 34 \%$$

Con la fórmula que propuso Alan O’Hara, el porcentaje de dilución sería un promedio de 34 %. Aunque las mineras artesanales con la finalidad de controlar dicho porcentaje emplean el método del Circado para su reducción. El método de O’Hara continúa con la aplicación de la siguiente fórmula y esta vez para determinar el ancho del desmonte.

Fórmula 2. Cálculo para determinar el ancho del desmonte

$$\% DIL = \frac{A.D.}{A.D. + A.V.}$$

% DIL= porcentaje de dilución

A.D = Ancho del desmonte

A.V = Ancho de la veta o potencia

Fuente: Quick guides to the evaluation of orebodies, 1980.

$$\% DIL = \frac{A.D.}{A.D. + A.V.}$$

$$34\% = \frac{A.D}{A.D + 0.60}$$

$$\frac{17}{50} = \frac{A.D.}{A.D. + A.V.}$$

$$17 (A.D + 0.60) = 50 A.D.$$

$$17 A.D. + 10.2 = 50 A.D.$$

$$17 A.D. - 50 A.D. = - 10.2$$

$$-33 A.D = -10.2$$

$$A.D. = \frac{10.2}{33}$$

$$A.D. = 0.31$$

Según el método de O'Hara, la barrenación debe ir puesta en roca caja a una distancia de 0.31 m con respecto a la veta. Luego se procede a calcular la nueva potencia con la que se propone trabajar en la labor y la cual se determina mediante la siguiente fórmula:

Fórmula 3. Cálculo de la nueva potencia

$$Potencia\ diluida = Ancho\ de\ la\ veta + Ancho\ del\ desmonte$$

Fuente: Quick guides to the evaluation of orebodies, 1980.

$$Potencia\ diluida = Ancho\ de\ la\ veta + Ancho\ del\ desmonte$$

$$Potencia\ diluida = 0.60\ m. + 0.31\ m.$$

$$Potencia\ diluida = 0.91\ m.$$

Para tener una dilución más controlada según O ‘Hara, como el proyecto explota sus vetas mediante el método del Circado se recomienda que primero se haga una voladura en la parte del estéril. Según el resultado final se consideraría un ancho de 0.31 m y posteriormente se procedería con una segunda voladura en la parte de la veta la cual posee una potencia de 0.60 m considerando la parte más ancha de la veta. Vale recalcar que la dilución es totalmente impredecible y que siempre existirá algún porcentaje de dilución que traiga material estéril, por lo que la empresa tendrá que recurrir alguna solución para separar dicho material del mineral.

- **Precio del ore sorting**

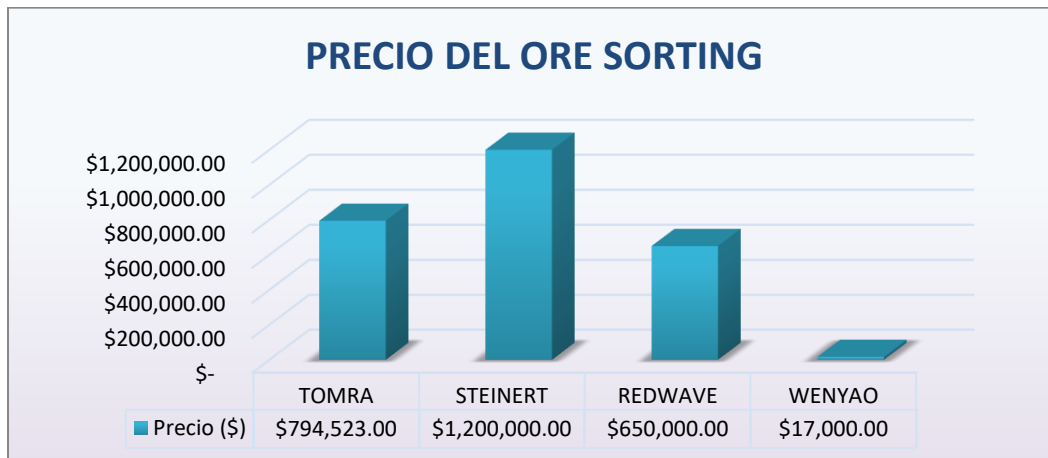


Figura 21. Precio del sistema ore sorting

Para realizar nuestra propuesta, fue fundamental considerar los precios del sistema ore sorting, para lo cual se tuvo que hacer una comparativa entre sus precios para determinar cuál es el que más se ajusta de acuerdo con la economía de una mina artesanal. El sistema que más se ajusta al proyecto es el sistema ore sorting distribuido por WENYAO, puesto que tiene un precio accesible de 17,000 \$, que en moneda peruana sería un equivalente a 63,571.50 soles.

- **Mineral ROM (run of mine)**

Tabla 3. Mineral ROM

Trabaja con mineral proveniente directo de mina				
	TOMRA	STEINERT	REDWAVE	WENYAO
Mineral ROM	Si	Si	Si	Si

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El ore sorting tiene la capacidad de trabajar con el mineral que sale directamente de las voladuras y esto no es independiente de una sola marca tal como se evidencio con la información proporcionada. La minería artesanal, realiza las actividades de pallaqueo con mineral ROM, sin la necesidad de pasarlo por algún proceso de conminución ya que el material sale lo suficientemente fragmentado. Por este motivo se pudo decir que aplicar el sistema ore sorting en la minería artesanal para separar la mena de la ganga, no implicará gastos adicionales en otros procesos ya que usualmente así es como se trabaja con el material.

- **Capacidad de procesamiento**

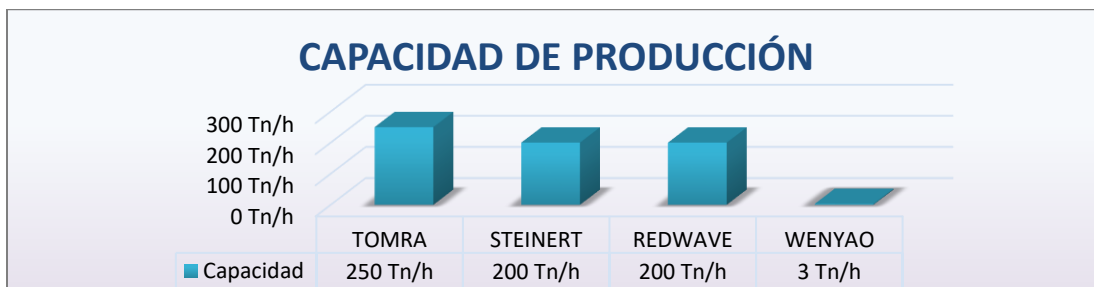


Figura 12. Capacidad de procesamiento del ore sorting.

Con respecto a la capacidad de procesamiento, fue evidente que el ore sorting distribuido por WENYAO es el que menor capacidad por hora procesa, pero esto no es impedimento para utilizarlo en el proyecto ya que 3 Tn/h son más que suficientes para el proyecto que produce 25 TM/día.

- **Cantidad de sensores al adquirir el sistema ore sorting**

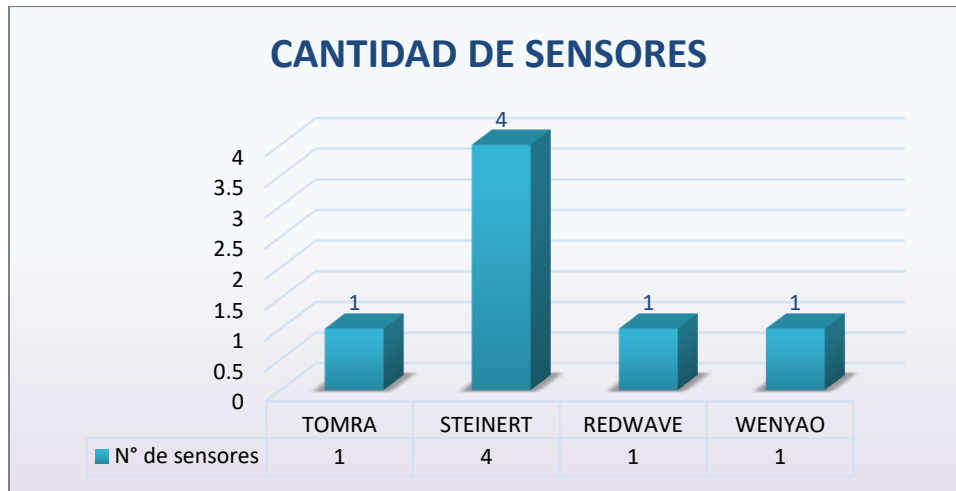


Figura 22. Cantidad de sensores al adquirir el sistema ore sorting.

Al adquirir el sistema ore sorting de la marca TOMRA, viene con un sensor el cual es XRT, referente a la marca STEINERT llega por fábrica con 4 sensores (XRT, COLOR, 3D & IAS), en cuanto a REDWAVE viene con un sensor que es XRF y acerca de la marca WENYAO viene con un sensor incorporado el cual es COLOR.

- **Feed del ore sorting**

Tabla 4. Feed

	Tipo de entrada			
	TOMRA	STEINERT	REDWAVE	WENYAO
Tipo de alimentación	Belt feed	Belt feed	Belt feed	Chute feed

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Otra característica que fue fundamental a considerar con respecto al ore sorting, es el tipo de alimentación puesto que los distribuidos por TOMRA, STEINERT y REDWAVE, tienen un tipo de alimentación a través de una faja transportadora, mientras que el distribuido por la marca WENYAO se da por medio de una tolva.

- **Niveles de radiación**

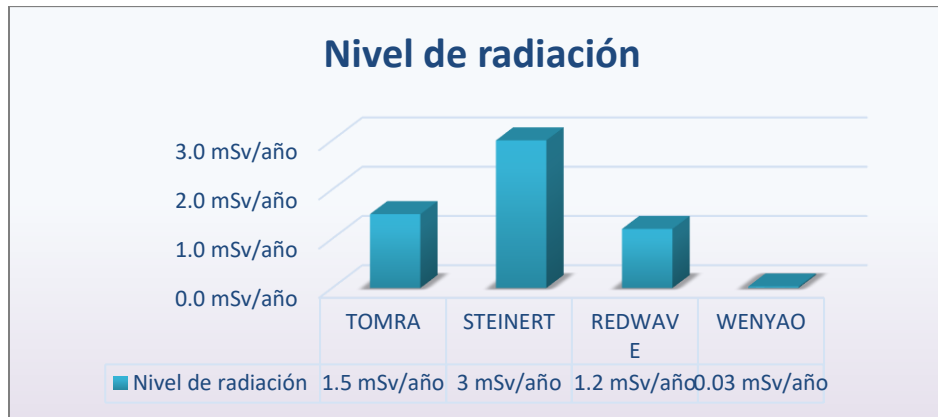


Figura 24. Nivel de radiación mSv/año

Fue de suma importancia considerar los niveles de radiación que emite el sistema ore sorting de cada marca. Quedo evidenciado que en el de la marca STEINERT es donde más mili sievert se emite, exactamente 3 mSv/año, y se pudo atribuir que esto se debe a que tiene mayor presencia de sensores. El siguiente es el de la marca TOMRA, que sigue con un valor de 1.5 mSv/año. Enseguida, se tuvo al de la marca REDWAVE, con un nivel de 1.2 mSv/año y por último tenemos al de la marca WENYAO con 0.03 mSv/año.

Tabla 5. Sensores aptos para emplear

SISTEMAS DE DETECCIÓN PARA CLASIFICADORES BASADOS EN SENSORES							
TIPO DE SENSOR	ABREVIATURA	PROPIEDAD	TIPO DE MINERAL	Au	Ag	Cu	Zn
Transmisión de rayos x	XRT	Coeficiente de atenuación lineal: rayos X	Metales básicos / preciosos, carbón, diamantes, etc.	✓	✓	✓	✓
Fluorescencia de rayos X	XRF	Composición elemental	Metales básicos / preciosos	✓	✓	✓	✓
Color	COLOR	Color, reflexión, brillo, transparencia	Metales básicos / preciosos, minerales industriales, piedras preciosas	✓	✓	✓	✓
Cámara Infrarroja	IR	Calentamiento y detección térmica infrarroja	Metales básicos, metales preciosos	✓	✓	✓	✓
Triangulación láser	3D	Detección superficial (Forma)	Metales básicos, metales preciosos, metales ferrosos	✓	✓	✓	✓

Fuente: TOMRA, 2021.

En la minería artesanal, se extraen metales preciosos en el que encontramos metales de oro y plata, asimismo se extraen metales básicos como lo son el cobre y el zinc. Para determinar que sensores son los más factibles a fin de relacionarlo al mineral que se explota en dicha mina, se trabajó con una ficha la cual fue proporcionada por la empresa TOMRA. La finalidad de esta es de determinar de manera general que sensores son los más acordes a utilizar sin la necesidad de emplear un análisis de laboratorio. Para darse cuenta de que sensores son los posibles a utilizar, se tuvo que poner en columnas todos los minerales que se explotan y ver si va acorde con el tipo del mineral con el que trabaja el sensor. Solo los sensores que trabajen con todos los minerales que se explotan en las minas artesanales fueron los más probables a utilizarse. En este caso los sensores que trabajan tanto con oro, plata, cobre y zinc fueron la transmisión de rayos x, fluorescencia de rayos x, color, cámara infrarroja y la triangulación laser. Los demás sensores que estuvieron incluidos en la ficha fueron descartados para las minas artesanales ya que no cumplían con las características del caso.

Tabla 6. Ensayo químico

Descripción de muestra	Leyes (g/Tm)	
	FIRE ASSAY (fundición y copelación)	Au (Oro)
1.40		266.10
Leyes (Oz/Tc)		
Au (Oro)		Ag (Plata)
0.041		7.761
Ley (%)		
VOLUMETRÍA	Cu (Cobre)	
	1.76	
	Ley (%)	
	Zn (Zinc)	
	1.79	

Fuente: elaboración propia, 2021. Presencia de minerales en el área de desmontes producto de las actividades de pallaqueo, en una mina artesanal.

En una Mina artesanal aurífera, se realiza la clasificación de estéril y mena mediante las actividades de pallaqueo. Esta actividad no es efectiva al 100% puesto que no se puede diferenciar la mena de la ganga solo con la ayuda del ojo humano, como consecuencia se termina depositando parte de la mena en el área de desmontes. Con la finalidad de evidenciar que parte de la mena no es aprovechada se procedió a realizar un ensayo químico mediante un análisis de laboratorio en donde se llevó una muestra del área de desmontes de 4Kg. Para determinar si existía presencia de oro y plata, se realizó el método del ensayo al fuego mediante la fundición y copelación, en donde arrojó como resultado que hay presencia de oro y plata, 1.40 g/Tm y 266.10 g/Tm respectivamente. En relación con el cobre y zinc, se procedió con un análisis químico por volumetría, con el cual se pudo determinar la concentración del cobre que fue de 1.76% y del zinc con un 1.79%. Con estos resultados proporcionados por el laboratorio, queda reflejado que no todo el mineral extraído es utilizado para su comercialización y es desaprovechado en el área de las desmonteras.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

Al determinar la transformación digital en la productividad de las operaciones mineras, se determinó que en las actividades mineras, es cada vez más profundo y complejo la necesidad de realizar una actividad minera sin accidentes, sustentable y amigable con el medio ambiente y que además de ello, opere de manera excelente, bajo este enfoque, la transformación digital tiene el desafío de ser el impulsor de la productividad, en este sentido, algunos ejemplos de transformación de las operaciones mineras gracias a la tecnología digital ha sido la incorporación de detonadores electrónicos para llevar a cabo las actividades de perforación y voladura y cuya característica principal es la seguridad y precisión a la hora de la detonación; la implementación de camiones autónomos para las actividades carguío y acarreo como el camión Komatsu 930E equipado con un sistema de dirección hidráulica que proporciona un mejor control de dirección y un mínimo esfuerzo por parte del operador y el proceso innovador Ore Sorting para el proceso de beneficio el cual consiste en clasificadores que incorporan sensores unidos a un potente procesador de datos, estos sensores reconocen el material objetivo en base a su color, densidad atómica y conductividad, además prolonga la vida útil de la mina y aumenta el valor global del yacimiento. Lo mencionado anteriormente puede ser corroborado por el autor Ruiz (2019) cuando menciona que la transformación digital más allá de adoptar tecnología también debe ser capaz de resolver problemas de negocio, siendo una herramienta clave para abordar el desafío de productividad en el sector minero. En este sentido, queda demostrado que la transformación digital, la automatización, la robótica el Big Data y la inteligencia artificial han impactado actualmente a todas las industrias a nivel mundial.

De acuerdo al diagnóstico de transformación digital en las operaciones mineras, se determinó que la Unidad Minera Toromocho ha implementado la tecnología 4.0 dentro de sus operaciones, ha incorporado el detonador eléctrico, la cual permite mejorar la fragmentación como también seguridad en el tajo de la Unidad Minera Toromocho. Según los indicadores de producción, aumentaron un 2.1% y 7% en los procesos de carguío, acarreo, chancado y molienda con el uso respectivo de los detonadores pirotécnicos. En cuanto al costo del detonador eléctrico dio US\$ 4, 052.31 siendo más caro en comparación al no electrónico, aunque en los procesos siguientes este costo se ve recuperado en la productividad del chancado y molienda ya que mejora significativamente, otra de las ventajas es su precisión y exactitud de 0.003% aproximadamente. Comprobándose que la transformación digital impacta positivamente, por lo tanto, la tecnología del detonador eléctrico ha sido ventajoso para la Unidad Minera Toromocho. Lo mencionado anteriormente puede ser corroborado por Romero (2016) cuando nos indica que el uso de los detonadores electrónico logra optimizar el P80 puesto que en el lado Oeste perfeccionó en 5.4% así mismo en el lado Este, el P80 perfeccionó en 16.7% en comparación del proceso de voladura con detonadores pirotécnicos, por otro lado el costo del detonador eléctrico es de US\$ 1 740.83 más caro por taladro, aunque este se recupera en los procesos siguientes, donde la productividad mejora en un buen porcentaje. En este sentido queda demostrado que la tecnología del detonador eléctrico permite tener un control en los tiros cortados, pero sobre todo logra mejorar la productividad, debido a que los detonadores electrónicos alcanzan optimizar la fragmentación haciendo que las operaciones de acarreo y carguío sean más dinámicas. Continuando con el diagnóstico de transformación digital en las operaciones mineras, se determinó que la Unidad Minera Radomiro Tomic ha implementado la tecnología 4.0 dentro de sus operaciones, en este sentido, ha incorporado el transporte autónomo 930E, la cual permite mejorar la seguridad y la

productividad en las operaciones de transporte. Según los indicadores de disponibilidad, el 86% corresponde a la maquina autónoma mientras que una maquina manual el 80%. Para el indicador de la productividad la maquina autónoma es 1 540 toneladas por persona al año mientras la manual es de 1 100 ton/per-año, por otro lado, las horas efectivas para el autónomo es de 17.3% y en el manual un 15.6%. Comprobándose que la transformación digital impacta positivamente, por lo tanto, la tecnología del camión autónomo 930E ha sido beneficioso para la Unidad Minera Radomiro. Lo mencionado anteriormente puede ser corroborado por el autor Navarro (2013) cuando nos indica que la productividad por tonelada aumento en 40% en comparación a la productividad actual, en cuestión al costo se ha ahorrado en unos US\$80 por tonelada para los 7 años según la evaluación que se ha ejecutado, donde la productividad mejora en un buen porcentaje. En este sentido queda demostrado que los camiones autónomos hacen que la productividad aumente, ya que los camiones manuales la productividad siempre se ha mantenido con el transcurso del tiempo, es por ello que la ejecución del camión autónomo es importante en las industrias mineras ya que así su productividad aumentaría con el pasar del tiempo.

Con respecto al objetivo de representar el proceso de la transformación según el autor explica que partir de la taxonomía y del patrón conceptual puede formalizarse de la forma siguiente: 1. Definición: “la Transformación digital es un cambio paradigmático esencialmente cultural, centrado en la experiencia y compromiso del cliente; que ocurre en un entorno de hiperconectividad y se caracteriza por la colaboración en todas las actividades de la cadena de valor; se habilita con tecnologías (disruptivas), nuevos modelos de negocio y nuevas competencias; e impacta en innovaciones organizacionales que provocan cambios en múltiples dimensiones, con énfasis en los procesos y modelos de negocio, y, simultáneamente, en las personas”. 2. Mecanismos

de adopción/implementación: “la Transformación digital puede ser implementada y adoptada mediante estrategias digitales, arquitecturas empresariales, marcos de referencia de interoperabilidad, infraestructuras, plataformas y otros mecanismos de gobernanza organizacional”. 3. Mejora continua: “la Transformación digital, como proceso evolutivo, puede ser medida en las organizaciones a través de modelos de madurez, indicadores claves de desempeño (KPIs), u otros sistemas de evaluación que incluyan sus múltiples aristas, con el fin de mejorar la eficiencia y desempeño de la organización y obtener una mayor y más personalizada satisfacción del consumidor. Para la presente tesis el proceso de transformación digital se determinaron cuatro subprocesos de los cuales son: Posicionar la organización en la digitalización guarda relación con la definición, revisión del estado actual tiene similitud con los mecanismos de adopción y la planificación, implementación y validación tiene una semejanza con la mejora continua.

De acuerdo a la comparación entre la transformación digital y la tecnología Ore sorting, se determinó que la Unidad Minera San Rafael al implementar tecnología 4.0 dentro de sus operaciones, la tecnología que implemento fue el “Ore Sorting”, la cual permite analizar la composición de la roca y a la vez clasificarlas en función de su ley, gracias a sus sensores unidos a un procesador de datos potente. Según los indicadores de producción, en el año 2019 se tuvo una producción de mineral extraído de hasta 1,111,464 Tn y una ley de mineral extraído de 1.66%. Así mismo, los avances realizados fueron de 18,105 metros, mostrando un descenso, esto producto de la nueva tecnología implementada, la cual permite bajar el de ratio estéril/mineral, aprovechando de una mejor forma el mineral, a su vez, el mineral tratado en planta ha sido de 1,981,097 Tn. Por otra parte, la tecnología Ore Sorting ha permitido incrementar la producción de mineral tratado en planta concentradora a 1,159,229 Tn, obteniendo una ley de mineral de 1.86% ha comparación de la técnica antigua, con una ley de 0.6%, por tanto, se obtuvo una recuperación de 94.19%, se puede

decir que la planta ha mantenido operando al 100% de su capacidad, así también, el costo por tonelada tratada ha sido de USD/TT 65.5 a comparación del año 2016 donde el costo por tonelada tratada ha sido de USD/TT 81.60. Comprobándose que la transformación digital está relacionada con, la tecnología Ore Sorting y ha sido ventajosa para la Unidad Minera San Rafael. Lo mencionado anteriormente puede ser corroborado por el autor Carcausto (2019) cuando indica que en la Minera Yanaquihua S.A.C. decidió aplicar transformación digital , en este proyecto de explotación y tratamiento de mineral marginal donde demostró que la tecnología con sensores llamado también como Ore Sorting era más rentable que los métodos convencionales, según los costos de operación se estimó un total de 233\$/Tn de mineral extraído y un costo de tratamiento de planta de 79\$/Tn, en este sentido, el tratamiento con ore Sorting presentó un VAN de 5.13 millones de dólares y TIR 153%, así también, la ley de corte para el tratamiento de minerales marginales es de 9.76 g/Tn con un cash cost all in de 795.3 \$/oz. En este sentido queda demostrado que la tecnología Ore Sorting permite prolongar la vida útil de la mina y aumentar el valor del yacimiento, siendo una técnica adecuada para llevar a cabo el tratamiento de minerales de leyes bajas y marginales, a su vez que se obtiene una mayor disponibilidad de la planta de beneficio, es por ellos que, Ore Sorting permite clasificar al mineral y por tanto aumentar la vida de las reservas minerales al reducir la ley de corte.

De acuerdo a la propuesta tecnológica del ore sorting en la minería artesanal aurífera. Se recurrió a recopilar una serie de datos los cuales fueron de necesidad para el cumplimiento del objetivo ya mencionado. Los datos que se necesitaron fueron con respecto a las características de la labor tal como se puede apreciar detalladamente en la tabla 1. Inmediatamente después de obtener los datos requeridos, se procedió a calcular el porcentaje de dilución mediante el método de O'Hara, en el cual los resultados evidenciaron 34%, adicionalmente como el proyecto trabaja

con el método selectivo del Circado, este método permitió saber el ancho del desmonte, el cual arrojó 0.31 m, el cual sumándole la potencia de la veta (0.60 m), se obtuvo la nueva potencia diluida, en la que arrojó 0.91 m. Frente a lo explicado, se presenta la propuesta del sistema ore sorting para disminuir el porcentaje de dilución. Estos datos fueron contrastados con la investigación de Valdivia (2017) quien propuso planificar un control adecuado acerca de la calidad del mineral y la dilución presente. Si bien es cierto, esta investigación no comparte el mismo objetivo literalmente, pero están estrechamente relacionados por un mismo problema y finalidad, que es el porcentaje de dilución y su interés en reducirla. En la unidad minera Arcata, el porcentaje de dilución fue de 90.55%, mientras que, en una mina artesanal aurífera, dicho porcentaje sería equivalente a un 34%, un porcentaje relativamente alto, considerando que el estándar promedio es de un 10% aproximadamente. Lo peculiar de la investigación de Valdivia es que con el ore control pudo reducir el porcentaje de dilución en un 17.9%, lo mismo que se busca lograr en una mina artesanal aurífera si se llegase incorporar el sistema ore sorting.

Con respecto a los resultados del último objetivo específico, se determinó mediante un ensayo químico en un laboratorio si hay presencia de minerales en el área de desmontes producto de las actividades de pallaqueo en una mina artesanal. Dicho análisis, arrojó como resultado que en el área de desmontes existe presencia de oro, plata, cobre y zinc con unas leyes correspondientes a 1.40 g/Tm, 266.10 g/Tm, 1.76%, 1.79% respectivamente en ese mismo orden. Está claro, que, si la mina artesanal aurífera se decidiera invertir por el sistema ore sorting, no solo obtendría el mineral que se extrae de las distintas labores, sino también el material que ya se encuentra inutilizable es las desmonteras.

La investigación de Carcausto (2019) sirvió para contrastarla con la investigación presente, ya que tuvo como propósito recuperar los minerales de estaño de baja ley que están depositados en el área

de desmontes mediante el ore sorting. Él también analizó el material que se encuentra en el área de desmontes y determinó que dicha unidad cuenta con 245,000 TM de material con una ley que va de 0.60% a 0.90%, llegando a la conclusión que si se incorpora el sistema ore sorting la empresa tendría un mayor ingreso económico. Algo semejante sucedería con las minas artesanales auríferas, ya que comenzarían a trabajar con material que se creyó no generaría beneficio alguno.

4.2. Conclusiones

El impacto de la transformación digital en la productividad de las operaciones mineras, ha sido indispensable su evolución para lograr mejorar la productividad, un mejor trabajo y un carácter cooperativo, algunos ejemplos de transformación de las operaciones mineras ha sido la incorporación de detonadores electrónicos para las actividades de perforación y voladura; la implementación de camiones autónomos para las actividades carguío y acarreo, es por ello que la transformación digital, la robótica entre otros han impacto considerablemente a las industrias en todo el mundo.

El diagnóstico de la transformación digital en las operaciones mineras, en el proceso de perforación y voladura, en base a la implementación de tecnología 4.0, la unidad Minera Toromocho creció entre 2.1% a un 7% debido a que los detonadores electrónicos logran optimizar la fragmentación haciendo que las operaciones de acarreo y carguío sean más dinámicas. Una de las ventajas de este detonador electrónico es su precisión y exactitud en la dispersión de los tiempos, así mismo entre el detonador electrónico y el detonador no electrónico existe una diferencia de los costos de US\$1,740.83 siendo el primero el más costoso, sin embargo, el primero es más óptimo debido a que se recuperará en los procesos posteriores, (chancado y la molienda) debido a que el detonador electrónico mejora el proceso de fragmentación de la roca. Así mismo en el proceso de

carguío y acarreo en base a la implementación de tecnología 4.0, en la Unidad Minera Radomiro Tomic mejoró en gran medida debido a la implementación de camiones autónomos, uno de ellos el camión 930E de la marca Komatsu. En cuanto a la comparación entre el método manual y la tecnología aplicada, se determinó que el primero de ellos produce 1,100 toneladas/persona/año, mientras que el segundo de ellos aumentó hasta en un 40% respecto al valor actual.

Los procesos que contempla la transformación digital comienza por Posicionar la organización en la digitalización, el cual considera un cambio cultural, a su vez está enfocado al usuario, gestiona la hiperconectividad y la colaboración. Así mismo, la revisión del estado actual se basa en la identificación de problemas a nivel general, donde se analiza las diferentes propuestas de mejora, Plataformas, estándares, infraestructura, estudio empresarial, estrategias empresariales, arquitectura empresarial, mecanismo de gobernanza. La planificación debe cumplir los procedimientos y estrategias en las áreas de impacto, innovación, cultura y contextos, roles, creación de valor, economía digital, modelo de negocio, eficiencia y desempeño operacional. Por ultimo La implementación y validación, se centra en la medición del sistema, modelo de madurez y el sistema de indicadores. Estos procesos son indispensables para la digitalización de una empresa y adaptarse a esta nueva era de la Transformación digital.

Se logró comparar a la transformación digital y el ore sorting con respecto a los aspectos: avance tecnológico, optimización del proceso, productividad, accidentabilidad, automatización, rentabilidad, innovación. Logrando obtener las características que indican que ambos generan un impacto positivo en su implementación.

En cuanto al último objetivo específico, una propuesta tecnológica del ore sorting, se determinó la presencia de minerales en el área de desmontes producto de las actividades de

pallaqueo de las minas artesanales auríferas. Para obtener estos resultados se procedió a realizar un ensayo químico mediante un análisis de laboratorio, donde nos arrojó que en el área de desmontes existe presencia de minerales de oro, plata, cobre y zinc. Para el oro y plata, se realizó un ensayo al fuego donde se obtuvo como resultado que las leyes eran de 1.40 g/Tm (Oro) y 266.10 g/Tm (Plata). Con respecto al cobre y zinc se aplicó el método por volumetría donde se obtuvo 1.76% y 1.79% respectivamente. Conforme con lo señalado y los resultados obtenidos, se puede deducir que las actividades de pallaqueo no son exactas y que si se incorpora el sistema ore sorting se estaría obteniendo ganancias de material que ya no es considerado dentro de su producción. Además, que la inversión según los precios mostrados de los sistemas de ore sorting se recuperaría en aproximadamente 7 meses.

REFERENCIAS

- Arre, M., Águila, C., Barsoccini, M., Becerra, M., Broschek, U., Cambiaso, O., Dourojeanni, A., González, T., Grunwald, M., Iribarren, J., Larraechea, R., León, M., Morgado, R., Oblasser, A., Peña, P., Rodríguez, M y Wood, P. (2016). *Desde el cobre a la innovación*. <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/04/Roadmap-miner%C3%ADa.pdf>
- Bauer, T., Tavakoli, S., Dehghannejad, M., García, M., Weihed, P. (2010). *4- Dimensional geological modelling of the skellefte district, sweden*. Revista International Archives of the photogrammetry. 37, 1. https://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4-W15/Paper_ISPRS/Poster/3_3DGeoInfo2010_135_Bauer_4_dimensional_Modelling.pdf
- Beltran Prieto, Y. y Giraldo Bedoya, E. (s.f). Transformación del modelo 4.0 en los sectores productivos en Colombia. [Tesis de título de Ciencias administrativas y económicas, Universidad de Cooperativa de Colombia]. https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/16016/1/2019_transformaci%C3%B3n_modelo_sectores.pdf
- Cabeza Gavira, R. (2018). *Industria 4.0 y sus aplicaciones a la optimización de procesos y eficiencia energética*. [Tesis de título de Ingeniería de la energía, Universidad de Sevilla]. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/82651/TFG-1989_CABEZA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Calama (2012). Tendencias en minería, aspectos destacados en el futuro de la automatización en la industria minera. Revista Accenture

<https://www.codelco.com/flipbook/innovacion/codelcodigital6/PDF/EXPOSICION/3/115p.pdf>

Carcauso Mamani, E. (2019). Optimización de Capex – Opex en la explotación de desmontes de mineral estaño de baja ley mediante la tecnología Ore Sorting en la Unidad Minera San Rafael – Minsur S.A – 2019. [Tesis de título para Ingeniero de minas, Universidad Nacional del Altiplano de Puno]

http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/14293/Carcausto_Mamani_Edwin.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Constructivo (2020). *Caterpillar lanza nueve máquinas en las Vegas*. Revista el constructivo.

[https://constructivo.com/actualidad/caterpillar-lanza-nueve-nuevas-maquinas-en-las-vegas-1584027641#:~:text=Las%20nuevas%20m%C3%A1quinas%20incluyen%20excavadoras,920\)%20y%20725%20camiones%20articulados.](https://constructivo.com/actualidad/caterpillar-lanza-nueve-nuevas-maquinas-en-las-vegas-1584027641#:~:text=Las%20nuevas%20m%C3%A1quinas%20incluyen%20excavadoras,920)%20y%20725%20camiones%20articulados.)

CEPAL. (2019). *La revolución industrial 4.0 y el advenimiento de una logística 4.0*. Revista FAL. 7, (375).

https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45454/S2000009_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Chuctaya Laucata, D y Larota Chara, M. (2020). Optimización de carguío y transporte en tiempo real mediante el software Jmineops en minería superficial – Caso de estudio. [Tesis de título de Ingeniería de minas, Universidad Tecnológica del Perú].

http://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/UTP/2816/1/Deyvi%20Chuctaya_%20Maria%20Larota_Tesis_Titulo%20Profesional_2020.pdf

Del Val Román, J.L. (sf). *Industria 4.0: la transformación digital de la industria.*

<http://coddii.org/wp-content/uploads/2016/10/Informe-CODDII-Industria-4.0.pdf>

Escudero, F. (2018). *Transformación Digital en el Perú.*

http://www.camara-alemana.org.pe/downloads/181030-08_EY.pdf

Especialistas en Gestión de datos (s.f). *Los 11 elementos de una solución Big Data.*

<https://landings.powerdata.es/elementos-de-una-soluci%C3%B3n-big-data>

Galaz Yamazaki, R (2018). *La paradoja de la Industria 4.0. superar las desconexiones en el camino hacia la transformación digital.*

<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/challenges-on-path-to-digital-transformation/summary.html>

Haro Freile, M. (2019). *Madurez digital, primer paso hacia la transformación digital: Desarrollo de un modelo de madurez digital para empresas de manufactura.* [Tesis de titulación de Ingeniero industrial, Universidad San Francisco de Quito].

<http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/8324/1/142704.pdf>

Hernández Martínez, C. (2017). *Gestión de la tecnología en los proyectos de innovación de una empresa peruana del sector minero. Un estudio de caso.* [Tesis de maestría en Gestión y políticas de la innovación y la tecnología, Universidad Católica del Perú].

http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/9869/Hern%c3%a1ndez_Mart%c3%adnez_Gesti%c3%b3n_tecnolog%c3%ada_proyectos1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Infanta Zeballos, P. (2019). *Gestión organizacional: La transformación digital como actor cultural*. [Tesis de maestría de Ingeniero industrial y de sistemas, Universidad del Desarrollo].

<https://repositorio.udd.cl/bitstream/handle/11447/3669/Gesti%C3%B3n%20organizaci%C3%B3n%20la%20transformaci%C3%B3n%20digital%20como%20actor%20cultural.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instituto de Ingenieros Minas del Perú, (2021). *Experiencia del Ore Sorting en San Rafael (Sn) y estudios con minerales de cobre y polimetálicos*.

<https://iimp.org.pe/noticias/experiencia-del-ore-sorting-en-san-rafael-sn-y-estudios-con-minerales-de-cobre-y-polimetalicos>

Instituto de Ingenieros Minas del Perú, (2021). *Ore Sorting en San Rafael*.

<http://www.mineriaonline.com.pe/actualidad/ore-sorting-en-san-rafael>

La minería facilitando el futuro (2019). *Minería subterránea, sinónimo de futuro*.

<https://nuevamineria01.akamaized.net/revista/wp-content/uploads/2019/09/nuevamineria-septiembre-2019.pdf>

Latinominera (2017). *Mina San Rafael del Minsur incrementa producción con tecnología Ore Sorting*.

<http://www.latinomineria.cl/blog/2017/11/15/mina-san-rafael-minsur-incrementa-produccion-tecnologia-ore-sorting/>

Magri Rivera, J (2014). *Efectos de la incorporación de tecnologías autónomas en el diseño y la planificación minera*. [Tesis de título de Ingeniero Civil de minas, Universidad de Chile]

<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131395/Efectos-de-la-incorporacion-de-tecnologias-autonomas....pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Medina Ramirez, Y e Barriga Ramos, M. (2019). *Uso de las tecnologías de la información (TICs) en operaciones mineras artesanales*. [Tesis de título de Ingeniero de minas, Universidad Tecnológica del Perú].

http://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/UTP/1685/1/Yherko%20Medina_Mayron%20Barriga_Tesis_Titulo%20Profesional_2019.pdf

Meller, P. y Salina, B. (2019). *Revolución tecnológica 4.0 y capital humano*.

<https://interminproject.org/wp-content/uploads/folletobeauchef25marzo.pdf>

Ministerio de minas y energía, (2015) *Glosario técnico minero*.

<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/698204/GLOSARIO+MINERO+FINAL+29-05-2015.pdf/cb7c030a-5ddd-4fa9-9ec3-6de512822e96>

Morales Távara, L. (2020). *Transformación digital: Conceptos claves y casos de éxito en el Perú*. [Tesis de bachiller de Ciencias con mención en Ingeniería Industrial, Universidad Católica del Perú].

http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/17069/MORANTE_TAVARA_LEANDRO_TRANSFORMACION%20DIGITAL_CONCEPTOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mujica Morovic, A. (2019). *Factibilidad de implementación de camiones autónomos en división Radomiro Tomic, Codelco*. [Tesis de grado para magister en Gestión y dirección de empresa, Universidad Chile].

<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/172650/Factibilidad-de-implementaci%C3%B3n-de-camiones-aut%C3%B3nomos-en-Divisi%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PriceWaterhouseCoopers. (2015). *Necesitamos hablar acerca del futuro de la minería.*

<https://www.pwc.com/gx/en/energy-utilities-mining/assets/pwc-mining-transformationfinal.pdf>

Ruiz Cayun, M. (20017). *Introducción curso camión Komatsu 930E-4.* Revista Anglo American.

<https://es.scribd.com/doc/248554005/M1-Introduccion-curso-camion-930e-4-Komatsu>

Ruiz del Solar, J. (2020). *Big Data en minería.* ISBN: 978-956-19-1185-7.

<http://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2020/09/Big-Data-en-Mineri%CC%81a.pdf>

Servicio nacional de geología y minería, (2014) *Perforación y voladura.* Guía de operación para la pequeña minería. Primera edición, 4.

<https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/6.perforacion-y-tronadura.pdf>

ANEXOS

ANEXO 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: “TRANSFORMACIÓN DIGITAL BAJO LA TECNOLOGÍA ORE SORTING Y SU APLICACIÓN EN MINAS ARTESANALES”					
PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVO GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	METODO	POBLACIÓN
		Determinar el impacto de la transformación digital en la productividad de las operaciones mineras.	Transformación digital	TIPO DE INVESTIGACIÓN: Básica. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: Experimental de tipo transversal descriptivo.	Operaciones mineras a tajo abierto y subterráneas.
¿Cómo ha impactado la transformación digital en la productividad de las operaciones mineras?	La transformación digital impacta en la productividad de las operaciones mineras.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS <ul style="list-style-type: none"> • Diagnóstico de transformación digital en las operaciones mineras. • Representar el proceso de la transformación digital • Comparar la transformación digital con el proceso de ore sorting • Propuesta tecnológica del ore sorting para una mina artesanal aurífera. 	VARIABLE DEPENDIENTE Bajo la tecnología ore sorting y su aplicación en minas artesanales	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS TÉCNICA: Análisis documental. INSTRUMENTOS Guía de análisis documental.	MUESTRA Operaciones unitarias de perforación, voladura, carguío, acarreo, planta de beneficio de minería a tajo abierto y subterránea. .


Fuente: *Elaboración propia, 2021.*

ANEXO 02: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES


TÍTULO: “IMPACTO DE LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL 4.0 EN LA PRODUCTIVIDAD DE LAS OPERACIONES MINERAS”					
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTO
VARIABLE INDEPENDIENTE Transformación digital	El término "Industria 4.0" se refiere a un nuevo modelo de organización y control de la cadena de valor en todo el sistema de fabricación que recorre el ciclo de vida del producto y la tecnología de la información lo apoya y lo hace posible (Del Val, s.f).	Revisión de trabajos de investigación con relación a tecnologías 4.0 que impactan hoy en día las operaciones mineras y cuyo objetivo es la automatización, mejora de los procesos y la optimización de la producción.	Automatización digital	Datos en tiempo real Sistemas virtuales	Guía de análisis documental
	La productividad de la industria extractiva puede definirse ampliamente como la relación del producto expresado en toneladas de material extraído, con respecto al insumo expresado en horas efectivas de trabajo. Sin embargo, el concepto de productividad de las operaciones mineras está cada vez más asociado a la sostenibilidad, la gestión eficaz de todos los procesos y la satisfacción de los Stakeholder (Salomón et.al., 2018).	Revisión de trabajos de investigación con relación a la productividad minera en minería a tajo abierto, así como de planes operativos y estratégicos implementados.		Descentralización Orientación a servicios Interoperabilidad	
VARIABLE DEPENDIENTE: Bajo la tecnología ore sorting y su aplicación en minas artesanales			Operaciones mineras	Modularidad	Guía de análisis documental
				Perforación	
				Voladura	
				Carguío	
				Acarreo	
				Beneficio	
				Ore sorting	

Fuente: *Elaboración propia, 2021.*

ANEXO 03: INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS


 UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE	INSTRUMENTO N°1: Perforación y voladura
	TÍTULO: “IMPACTO DE LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL EN LA PRODUCTIVIDAD DE LAS OPERACIONES MINERAS”
<p>OBJETIVO: Este instrumento tiene como objetivo recopilar información documentaria respecto a las innovaciones tecnológicas en las operaciones de perforación y voladura las cuales han sido aplicadas en diferentes unidades mineras del país, así como de unidades mineras internacionales, cuyo fin es analizar cómo es que a través de esta tecnología se ha incrementado la producción.</p>	

INDICADOR		COSTOS			
		Número de taladros	Cantidad	Precio US\$/U	PRECIO TOTAL
No electrónico	Booster 2Lb	100	1	11	1072
Electrónico	Booster 2Lb	100	1	11	1072
No electrónico	Detonador no eléctrico	100	2	4.65	930
Electrónico	Detonador eléctrico	100	1	25	2,507
No electrónico	Conectadet	100	1	2.49	298.8
Electrónico	Cable de conexión	100	1	2.77	8.31
No electrónico	Linea exel TD	100	1	10.68	10.68
Electrónico	Detonador no eléctrico	100	1	4.65	465

 UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE	INSTRUMENTO N°2: Carguío y acarreo
	TÍTULO: “IMPACTO DE LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL EN LA PRODUCTIVIDAD DE LAS OPERACIONES MINERAS”
<p>OBJETIVO: Este instrumento tiene como objetivo recopilar información documentaria respecto a las innovaciones tecnológicas en las operaciones de carguío y acarreo las cuales han sido aplicadas en diferentes unidades mineras del país, así como de unidades mineras internacionales, cuyo fin es analizar cómo es que a través de esta tecnología se ha incrementado la producción.</p>	

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
Disponibilidad	%	86	80
Uso disponibilidad	%	94	83
Utilización efectiva en base a disponibilidad	%	84	81
Productividad	Ton/per-año	1540	1100
Horas efectivas	%	17.3	15.6
Velocidades	Km/hr	30	40
Payload CAEX	Ton	290	290
Neumáticos	Desgaste mm/ciclo	0.014	0.015
	Costo US\$	50,000	50,000
Combustibles	Lts/ton	0.48	0.51
	Costo US\$	0.58	0.58
Costo RETROFIT	US\$	1,000	0
Costo operador	US\$/AÑO - OP	0	26,000
Costo de mantenimiento y operación	US\$	100	100
Costo de lubricantes	US\$/hr	10	10
Costos de licencia	US\$	0.28	0

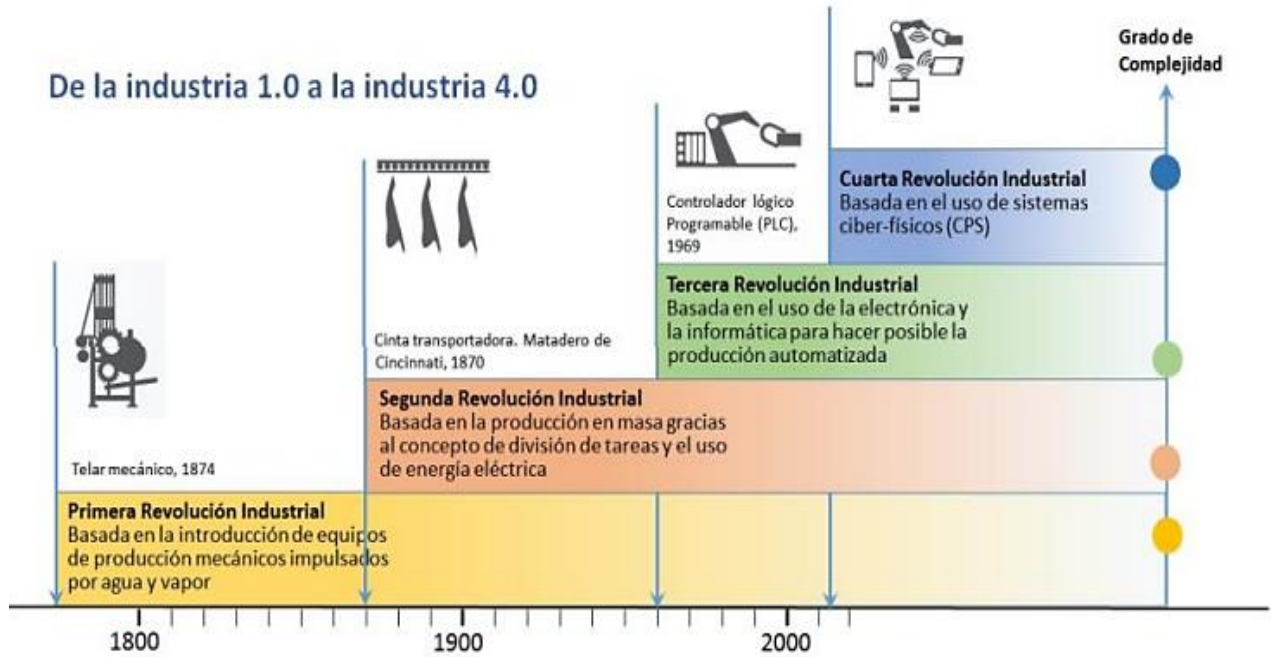
Fuente: Elaboración propia, 2021.

 UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE	INSTRUMENTO N°2: Carguío y acarreo
	TÍTULO: “IMPACTO DE LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL EN LA PRODUCTIVIDAD DE LAS OPERACIONES MINERAS”
<p>OBJETIVO: Este instrumento tiene como objetivo recopilar información documentaria respecto a las innovaciones tecnológicas en las operaciones de planta de beneficio las cuales han sido aplicadas en diferentes unidades mineras del país, así como de unidades mineras internacionales, cuyo fin es analizar cómo es que a través de esta tecnología se ha incrementado la producción.</p>	

CATEGORÍA	INDICADOR	UNIDAD	AÑO			
			2016	2017	2018	2019
PLANTA	Mineral tratado – planta concentrada	TN	1,047,506	1,101,853	1,134,926	1,159,299
PLANTA	Ley de mineral tratado	%	1.97	1.75	1.75	1.86
PLANTA	Recuperación total	%	90.87	92.16	93.39	94.19
PLANTA	Finos Sn	tn	18,798	17,791	18,601	20,273
PLANTA	Utilización planta	%	98.96	99.62	98.24	97.75
UNIDAD MINERA	Costo por tonelada tratada	US\$/TT	81.60	70	64	65.50
MINA	Mineral extraído	Tn	1,101,190	1,049,707	1,084,700	1,111,464
MINA	Ley mineral extraído	% Sn	1.69	1.52	1.56	1.66
MINA	Avances	M	29,461	27,478	18,724	18,105
PLANTA	Mineral tratado – total plantas	M	1,434,808	1,700,443	1,871,288	1,981,097

Fuente: Elaboración propia, 2021.

ANEXO 4: LA CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL



Fuente: Del Val (s.f).

ANEXO 5: ÁREAS DE ESTUDIO DEL PROCESO DE DIGITALIZACIÓN

CONEXIÓN DE REDES	DIGITALIZACIÓN	TECNOLOGÍAS ACTUALES
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Información de valor.	<input type="checkbox"/> Integración cadena de valor.	<input type="checkbox"/> Flexibilidad.
<input type="checkbox"/> Calidad.	<input type="checkbox"/> Relación clientes.	<input type="checkbox"/> Eficiencia y productividad.

Fuente: Cabeza (2018).

ANEXO 6: PROCESOS DE ESTUDIO



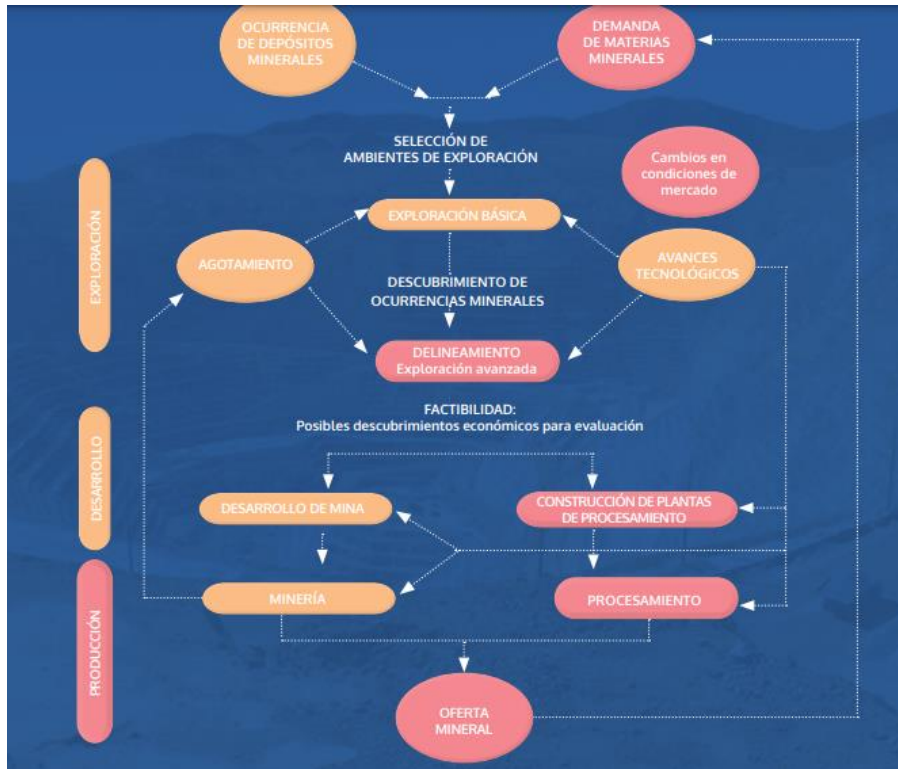
Fuente: Cabeza (2018).

ANEXO 7: EXPLORANDO EN EL FUTURO MINERO



Fuente: PwC (2015).

ANEXO 8: ETAPAS DE DESARROLLO



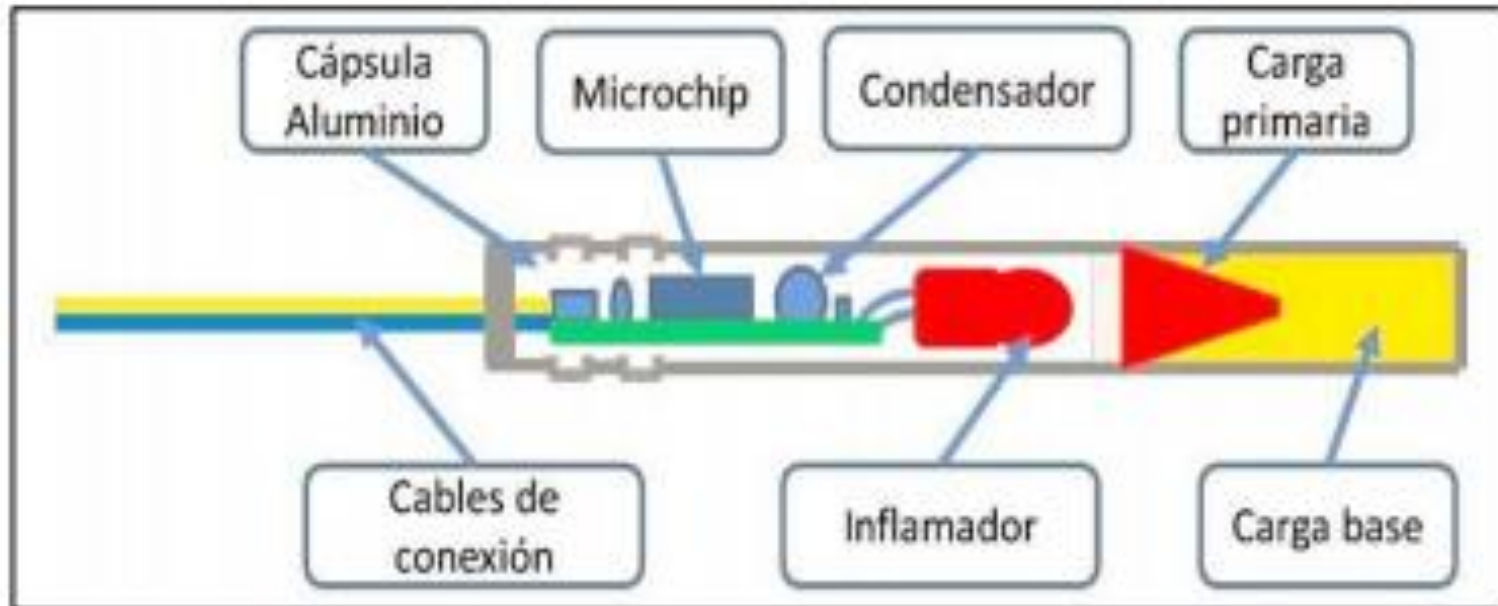
Fuente: Ruiz (2020).

ANEXO 09: PLANO DE UBICACIÓN DE LA UNIDAD MINERA



Fuente: Desarrollo peruano, 2013.

ANEXO 10: DETONADOR ELECTRÓNICO



Fuente: Romero, 2016.

ANEXO 11: INDICADORES DE COSTO

Tabla 7

Costos de Booster 2Lb

INDICADOR		COSTO			
		Número de taladros	Cantidad	Precio US\$/U	PRECIO TOTAL US\$
NO ELÉCTRICO ELÉCTRICO	Booster 2Lb	100	1	11	1072
	Booster 2Lb	100	1	11	1072

Fuente: Romero, 2016.

Tabla 8

Costos de detonador

INDICADOR		COSTO			
		Número de taladros	Cantidad	Precio US\$/U	PRECIO TOTAL US\$
NO ELÉCTRICO ELÉCTRICO	Detonador no eléctrico	100	2	4.65	930.00
	Detonador eléctrico (i-Kon)	100	1	25	2507

Fuente: Romero, 2016.

Tabla 9

Costo de conexión

INDICADOR		COSTO			
		Número de taladros	Cantidad	Precio US\$/U	PRECIO TOTAL US\$
NO ELÉCTRICO ELÉCTRICO	Conectadet	100	1	2.49	298.80
	Cable de conexión	100	1	2.77	8.31

Fuente: Romero, 2016

Tabla 10

Costo de línea / detonador

INDICADOR		COSTO			
		Número de taladros	Cantidad	Precio US\$/U	PRECIO TOTAL US\$
NO ELÉCTRICO ELÉCTRICO	Línea exel TD	100	1	10.68	10.68
	Detonador No eléctrico	100	1	4.65	465

Fuente: Romero, 2016.

ANEXO 12: PLANO DE UBICACIÓN DE LA UNIDAD MINERA RADOMIRO TOMIC



Fuente: Heuser y Campos, 2015

ANEXO 13: EVOLUCIÓN DE LO MANUAL A LO AUTÓNOMO



Fuente: Calama, 2012.

i. Unidad Minera Radomiro Tomic

En este apartado se ha tomado como referente a la Unidad Minera Radomiro Tomic que pertenece a Codelco, ubicado en la ciudad de Calama, en la región de Antofagasta en Chile (Ver Anexo 13: Plano de ubicación de la Unidad Minera Radomiro Tomic), cuyo inicio de sus operaciones se dio en el año 1998. A continuación, se muestra la tabla N°12 que especifica de manera detallada algunos aspectos importantes de la Unidad Minera Radomiro Tomic.

Tabla 11

Aspectos generales de U.M Radomiro Tomic

UNIDAD MINERA RADOMIRO TOMIC	
Tipo de operación	Mina a tajo abierto de cobre.
Procesos	Lixiviación química
Ley promedio	0.5%
Producción en 2019	266.415 toneladas de cobre
Vida útil estimada	32

Fuente: Elaboración propia, 2021.

ii. Transporte Autónomo 930E

La unidad minera Radomiro Tomic ha implementado camiones autónomos, como es el caso del camión Komatsu 930 E (Anexo 14: Camión Komatsu 930E), la cual carga 300 toneladas, donde su peso cargado es de 500 toneladas, con una altura de 7.4 m. Los neumáticos de este camión tienen una altura aproximada de 4 m la cual duplican la estatura de una persona. Esta maquinaria cumple con todos los requerimientos que una mina a tajo abierto y subterránea necesita, ya que se cuenta con neumáticos adaptados para rodajes a gran velocidad y una capacidad de carga. Siendo esta una gran inversión de US\$ 3,5 a 4 millones, donde Chile es uno de los países que utilizan este tipo de

maquinaria, la cual llega por barco y desarmada, ya que es transportada en camiones a diferentes proyectos mineros y una vez en su destino es armada. La evolución de lo manual a lo autónomo ha ido por etapas, se empezó con la operación del personal dentro de la máquina, después la tele operación para llegar así a lo autónomo que es la última tecnología que se utiliza en la actividad minera en las diferentes etapas de su proceso (Anexo 15: Evolución de manual a lo autónomo).

Algunas ventajas de estos camiones autónomos que se utilizan últimamente en las industrias mineras, especialmente del camión 930E son:

- Equipado con un sistema de dirección hidráulica que proporciona un mejor control de dirección y con un mínimo de esfuerzo del operador.
- Los cargadores con nitrógeno proporcionan una manera automática en caso emergencia, si es que la presión hidráulica cae por debajo del mínimo.
- El retardo dinámico es para la reducción de la velocidad del camión y así controlar la velocidad en una pendiente.

ANEXO 14: INDICADORES DEL CAMIÓN 930E

Tabla 12

Indicador de disponibilidad.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
DISPONIBILIDAD	%	86	80

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 13

Indicador del uso de la disponibilidad.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
USO DISPONIBILIDAD	%	94	83

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 14

Indicador de la utilización efectiva en base a disponibilidad.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
UTILIZACIÓN EFECTIVA EN BASE A DISPONIBILIDAD	%	84	81

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 15

Indicador de productividad.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
PRODUCTIVIDAD	Ton/per-año	1,540	1,100

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 16

Indicador de horas efectivas.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
HORAS EFECTIVAS	%	17.3	15.6

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 17

Indicador de velocidad.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
VELOCIDADES	Km/hr	30	40

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 18

Indicador de Payload CAEX.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
Payload CAEX	ton	290	290

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 19

Indicador de neumático.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
NEUMÁTICOS	Desgaste [mm/ciclo]	0.014	0.015
	Costo US\$	50,000	50,000

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 20

Indicador de combustible.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
COMBUSTIBLES	Lts/ton	0.48	0.51
	Costo US\$	0.58	0.58

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 21

Indicador RETROFIT.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
RETROFIT	ton	290	290

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 22

Indicador de operador.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
COSTO OPERADOR	US\$/año/op		26,000

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 23

Indicador de costo de mantenimiento y operación.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
COSTO DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN	US\$/hr	100	100

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 24

Indicador de costo de lubricantes.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
COSTO DE LUBRICANTES	US\$/hr	10	10

Fuente: Mujica, 2019.

Tabla 25

Indicador de costo de licencia.

INDICADOR	UNIDAD	AUTÓNOMO	MANUAL
COSTO DE LICENCIA	US\$/hr	10	0

Fuente: Mujica, 2019.

ANEXO 15: PLANO DE UBICACIÓN DE LA UNIDAD MINERA SAN RAFAEL



Fuente: Carcausto, 2019.

ANEXO 16: PLANTA ORE SORTING



Fuente: Carcausto, 2019.

ANEXO 17: RESULTADOS DEL ENSAYO QUÍMICO



Amadeo Avogadro Laboratorio Químico
ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES

CERTIFICADO DE ENSAYO QUIMICO

Cliente: MINERA ARTESANAL 1 Certificado N°008608
Muestra: ANALISIS DE MINERAL
Codificación: MA1
Detalle del envase: BOLSA SIN SELLAR
Fecha de recepción: 28/06/2021
Fecha de emisión: 30/06/2021

RESULTADOS:

Descripción de Muestra	LEYES (g/tm)		Ley(%)
	Au (Oro)	Ag (Plata)	Cu(COBRE)
A. MINERAL	1.40	266.10	1.76
	LEYES (oz/tc)		Ley(%)
	Au (Oro)	Ag (Plata)	Zn(ZINC)
	0.041	7.761	1.79

Método Analítico: FIRE ASSAY (fundición y copelación)
Analito: Au - Ag
Método Analítico: VOLUMETRIA
Analito: Cu-Zn



Ing. Luis Torres Sevilla
JEFE DE LABORATORIO
CIP. N° 192922





NOTA: LOS RESULTADOS DE LOS ELEMENTOS CUANTIFICADOS

POR VOLUMETRIA MENORES AL 1% SE RECOMIENDA ENSAYO DE ABSORCIÓN ATÓMICA

*Este reporte no debe reproducirse total ni parcial sin autorización escrita de Amadeo Avogadro Laboratorio.

*Los resultados de este Certificado solo corresponden a la muestra recibida en nuestra oficina.

*Los resultados de las muestras se guardarán por un periodo máximo de 1 mes.

 Mz H – Lt 9. URB. MOCHICA – TRUJILLO
 979434806 - 956986359
 amadeoavogadro.laboratorio@hotmail.com
 Amadeo Avogadro Laboratorio

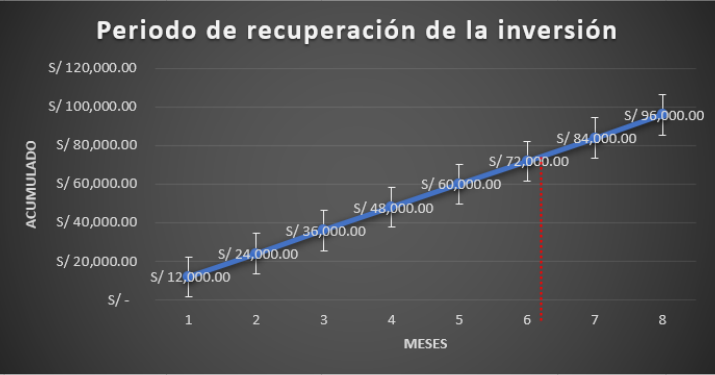
ANEXO 18: INDICADOR DE PERÍODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

(PRI)

Periodo de recuperación		
Mes	Flujo	Acumulado
0	S/ 73,297.00	
1	S/ 12,000.00	S/ 12,000.00
2	S/ 12,000.00	S/ 24,000.00
3	S/ 12,000.00	S/ 36,000.00
4	S/ 12,000.00	S/ 48,000.00
5	S/ 12,000.00	S/ 60,000.00
6	S/ 12,000.00	S/ 72,000.00
7	S/ 12,000.00	S/ 84,000.00
8	S/ 12,000.00	S/ 96,000.00
PR=	6.1	Meses

1 pallaquera =	1200/mes
10 pallaqueras=	12000/mes

Sistema ore sorting	Sorter	S/	67,354.00
	Aire comprimido	S/	5,943.00



Fuente: Elaboración propia, 2021.

ANEXO 19: ESQUEMA DE PROCESOS PARA PROPUESTA

